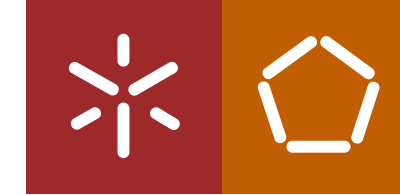


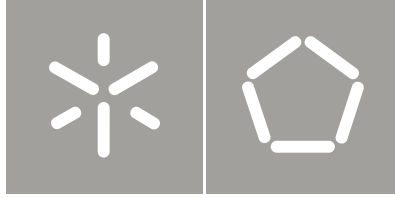


Miguel António Novera Alves

Simulação numérica do comportamento ao impacto de estruturas com resposta adaptada à intensidade do choque

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Miguel António Novera Alves

Simulação numérica do comportamento ao
impacto de estruturas com resposta adaptada
à intensidade do choque

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Nuno Peixinho

Resumo

Hoje em dia, na indústria dos transportes existe uma grande preocupação em desenvolver as novas estruturas para que maximizem a absorção da energia resultante de um possível impacto, protegendo desta forma os seus ocupantes. Por outro lado, os Engenheiros actuais enfrentam outro grave problema com a questão da poluição ambiental pelo que é imperativo que o novo desenvolvimento de estruturas para veículos tenha como princípio a maior redução possível do peso das mesmas, sem que se prejudique a segurança dos seus ocupantes. Até aqui reduzir o peso de uma estrutura, mantendo a mesma capacidade de absorção de energia, requeria a utilização de materiais mais resistentes e, conseqüentemente, de custo mais elevado. A alternativa passa pela utilização dos mesmos materiais mas mudando a estratégia de absorção de energia, com a criação e introdução de novos dispositivos nas estruturas dos veículos, concebidos especialmente com esse propósito. Assim sendo, neste trabalho será apresentada uma abordagem alternativa relativamente à absorção de energia, em que se recorre à pressurização interna das estruturas por forma a compensar uma eventual redução da espessura do material que a constitui. Serão realizadas simulações numéricas de impacto axial numa estrutura tubular de paredes finas com secção transversal circular, que se apresentará como uma aproximação a uma longarina frontal de um veículo automóvel. O objectivo principal deste trabalho consiste em estudar o efeito da sua pressurização interna, no âmbito de uma perspectiva de crashworthiness, bem como a possibilidade de se efectuar uma redução na espessura de parede, reduzindo também o seu peso. Pretende-se obter a mesma resposta ao choque que na situação de não pressurização e de espessura de parede maior. Será utilizado o *software* LS – DYNA™ para efectuar as simulações numéricas.

Palavras-chave: Simulação numérica, LS-DYNA™, Absorção de energia, Crashworthiness.

Abstract

Today, in the transport industry there is great concern in developing new structures to maximize the absorption of energy resulting from a possible impact, thereby protecting its occupants. Moreover, the present Engineers face another serious problem with the problem of environmental pollution and it is imperative that the new development of structures for motor vehicles as a principle has the greatest possible reduction of the weight thereof, without being detrimental to the safety of its occupants. So far reducing the weight of a structure while retaining the same ability to absorb energy, required the use of more resistant materials and, consequently more expensive. The alternative is the use of the same materials but changing the strategy for energy absorption, and the creation of new devices introduced in the structures of vehicles specially designed for this purpose. Therefore this study is presented an alternative approach for the absorption of energy, which uses the internal pressurization of the structures in order to compensate for any reduction in the thickness of the material that constitutes it. Numerical simulations will be conducted on axial impact of thin walled tubular structure with circular cross section, which is present as an approximation to a front beam of a motor vehicle. The main objective of this work consists in studying the effect of its internal pressurization, within a perspective crashworthiness, as well as the possibility to effect a reduction in wall thickness also reduces the weight thereof. The aim is to achieve the same response to shock in a situation of no pressurization, and a wall thickness larger. Will be used software LS - DYNA TM to perform numerical simulations.

Keywords: Numerical simulation, LS-DYNA TM, Energy Absorption, crashworthiness.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha família, especialmente à minha mãe, que sempre me apoiou e incentivou ao longo destes anos de estudo.

Um agradecimento especial à Cristiana, pela sua paciência, compreensão, motivação, apoio e amor não só durante a realização deste trabalho, mas também ao longo de todo o curso.

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio, a orientação, o empenho, a experiência e o elevado conhecimento do meu orientador, o Professor Nuno Peixinho.

A todos o meu:

Muito Obrigado!

Este trabalho é dedicado ao meu avô, Manuel Ferreira Novera.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	iv
Agradecimentos	v
Índice	vi
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xi
Nomenclatura Utilizada.....	xii
1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	9
2.1 Absorção de Energia de Impacto por Deformação Plástica	9
2.2. Estruturas Tubulares de parede fina.....	11
2.2.1. Modos de colapso.....	12
2.2.2. Iniciadores de Deformação.....	16
2.3 Crashworthiness.....	19
2.4 Estruturas Adaptativas para Crashworthiness.....	21
2.4.1-Pressurização Interna de estruturas	24
2.5 Ensaios Experimentais de Impacto	30
2.5.1 Euro NCAP	31
2.5.2 Drop test	34
2.5.3- Comparação de Estruturas para Absorção de Energia	38
2.6 Ensaios Numéricos	39
2.6.1 LS DYNA™.....	39
2.7 Aço inoxidável H400	43
3. Construção do Modelo Numérico	46
3.1. Geometria Pretendida.....	46

3.2. Keywords Utilizadas	47
3.3. Pressão Interna no Modelo Numérico	56
4. Resultados e Discussão.....	58
4.1. Ensaios sobre Estrutura Inicial.	58
4.2. Ensaios sobre Redução da Espessura de Parede.	65
4.3. Comparação de Resultados.	71
4.4. Cálculo da Redução de Peso da Estrutura.....	77
5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	79
6. Referências	82
ANEXO A- Tutorial LS-DYNA™.....	86
ANEXO B- Estruturação de uma Keyword completa.....	94
ANEXO C- Desenho Técnico da Estrutura.....	98
ANEXO D- Desenho Técnico da Estrutura com Redução de Espessura	99

Lista de Figuras

Figura 1 - Gráfico sinistralidade segundo a natureza do acidente em 2010.....	1
Figura 2 - Dados sobre colisões ocorridas em Portugal no ano 2010	1
Figura 3 - Deformação de uma longarina frontal num veículo moderno.....	2
Figura 4 - Deformação ocorrida em modelo real num ensaio experimental.	2
Figura 5 - Relação entre as emissões de CO ₂ e o peso do automóvel	3
Figura 6 - Crash-test agência Euro NCAP BMW serie 3 de 2005	5
Figura 7- Dummie adulto concebido para impactos frontais	5
Figura 8 - Torre de queda de peso (Drop test) do laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade do Minho	6
Figura 9 - Utilização de estruturas tubulares de parede fina em estruturas de veículos..	11
Figura 10 - Comparação entre secção transversal circular e rectangular	12
Figura 11 - Tubos circulares de parede fina sujeitos a impacto axial com diferentes velocidades. a) Encurvadura dinâmica; b) Encurvadura com colapso progressivo (modo colapso “Concertina”).....	13
Figura 12 - Diversos tipos de colapso: a) Concertina; b)Diamante; c)Concertina/Diamante; d) Euler; e) Inclinação do eixo do tubo.....	13
Figura 13 - Curva típica Carga vs Deslocamento para um ensaio de compressão axial de uma estrutura tubular, com indicação da carga média P _m	15
Figura 14 - Construção de Iniciadores de Deformação.	17
Figura 15 - Ensaio sem Triggers vs Ensaio com Triggers.....	18
Figura 16 - Curva Carga vs Deslocamento ensaio sem triggers.....	18
Figura 17 - Curva Carga vs Deslocamento ensaio com triggers.	19
Figura 18 - Funcionamento do sistema PRE-SAFE®.	23
Figura 19 - Inovação no sistema PRE-SAFE® do Mercedes-Benz Classe S.	23
Figura 20 - Pára-Choques móvel para absorver mais energia cinética do impacto.....	25
Figura 21 - Insuflador de barra metálica de aplicação nas portas para impacto lateral..	26
Figura 22 - Vista de corte da barra metálica insuflável no Mercedes-Benz Research Vehicle ESF 2009, mecanismo pirotécnico à esquerda.....	26
Figura 23 - Vista em pormenor da barra metálica insuflável.	27
Figura 24 - Funcionamento da barra metálica insuflável.	28
Figura 25 - Curva Carga-Deslocamento de estudo porta pressurizada.	28

Figura 26 - Componente frontal pressurizado Mercedes-Benz	29
Figura 27 - Gráfico dos resultados obtidos na simulação numérica do componente frontal pressurizado do Mercedes-Benz Classe S.....	30
Figura 28 - Impacto frontal Euro NCAP e resultados esperados nos ocupantes	32
Figura 29 - Impacto lateral com outro veículo Euro NCAP	32
Figura 30 - Impacto lateral com poste Euro NCAP.	33
Figura 31 - Teste Impacto Traseiro Euro NCAP.....	33
Figura 32 - Atropelamento de pedestres e respectivas leituras esperadas.	33
Figura 33 - Exemplos de 2 Dummies adultos da Euro NCAP	34
Figura 34 - Torre de queda do DEM, Universidade do Minho	35
Figura 35 - Câmara de alta Velocidade Photron ultima APX-RS do DEM, Universidade do Minho.	35
Figura 36 - Curva típica carga-deslocamento para um ensaio de compressão axial de uma estrutura tubular, com indicação da carga média P_m	37
Figura 37 - Exemplos de aplicações em LS-DYNA™: a) Crashworthiness; b) Protecção de ocupantes; c) Drop Test; d) Tecnologia airbag; e) Atropelamento de peões; f) Análise sísmica.	40
Figura 38 - Representação gráfica de integração explícita.....	41
Figura 39 - Exemplo de estruturação das Keywords no LS-DYNA™, secção de definição de curvas características.	42
Figura 40 - Exemplo de estruturação das Keywords no LS-DYNA™, secção de definição das propriedades do material.	42
Figura 41 - Taxa de alongamento para aço inoxidável H400.....	43
Figura 42 - Curva Tensão real Vs Deformação real para aço inoxidável H400.....	45
Figura 43 - Dimensões nominais da estrutura tubular circular de espessura 1.14mm. ..	46
Figura 44 - Criação da casca cilíndrica.	48
Figura 45 - Iniciadores de Deformação introduzidos na casca cilíndrica.....	49
Figura 46 - Restrições aplicadas aos nós que constituem a base da estrutura.	49
Figura 47 - Aplicação da parede rígida móvel.	50
Figura 48 - Atribuição de identificação e propriedades da parede rígida móvel.....	51
Figura 49 - Definição da Curva do material e de pressão interna.	52
Figura 50 - Propriedades do Material Piecewise_Linear_Plasticity.....	53
Figura 51 - Definir a secção da estrutura.....	53
Figura 52 - Elemento de casca tipo 2 Belytschko – Tsay.....	54

Figura 53 - Parâmetros a controlar na simulação.	55
Figura 54 - Atribuição da Pressão Interna.	57
Figura 55 - Gráfico ilustrativo do aumento da carga média.	60
Figura 56 - Gráfico das curvas Deslocamento Vs Tempo (1.14_10014).	62
Figura 57 - Gráfico das curvas Carga Vs Deslocamento com indicação de Pm (1.14_10014).	62
Figura 58 - Gráfico das curvas Deslocamento Vs Tempo (1.14_17777).	64
Figura 59 - Gráfico das curvas Carga Vs Deslocamento com indicação de Pm (1.14_17777).	64
Figura 60 - Gráfico Deslocamento Vs Tempo para determinar a espessura.	65
Figura 61 - Gráfico das curvas Deslocamento Vs Tempo (1.045_10014).	68
Figura 62 - Gráfico das curvas Carga Vs Deslocamento com indicação de Pm (1.045_10014).	68
Figura 63 - Gráfico das curvas Deslocamento Vs Tempo (1.045_17777).	70
Figura 64 - Gráfico das curvas Carga Vs Deslocamento com indicação de Pm (1.045_17777).	70
Figura 65 - Gráfico da comparação das curvas Deslocamento Vs Tempo (1.14_10014 Vs 1.045_10014).	73
Figura 66 - Gráfico da comparação das curvas Carga Vs Deslocamento com indicação de Pm (1.14_10014 Vs 1.045_10014).	73
Figura 67 - Gráfico da comparação das curvas Deslocamento Vs Tempo (1.14_17777 Vs 1.045_17777).	76
Figura 68 - Gráfico da comparação das curvas Carga Vs Deslocamento com indicação de Pm (1.14_17777 Vs 1.045_17777).	76

Lista de Tabelas

Tabela 1- Constantes da equação de Cowper e Symmonds para diferentes materiais...	10
Tabela 2- Parâmetros a considerar na simulação numérica.....	38
Tabela 3 - Propriedades do Aço H400.....	44
Tabela 4 - Keywords utilizadas no LS-DYNA™.....	47
Tabela 5 - Nomenclatura utilizada nos ensaios e parâmetros dos mesmos.	58
Tabela 6 - Resultados Obtidos nos ensaios iniciais.	59
Tabela 7 - Modo de colapso ao longo do tempo para os dois ensaios a 10014mm/s.....	61
Tabela 8 - Modo de colapso ao longo do tempo para os dois ensaios a 17777mm/s.....	63
Tabela 9 - Redução da Espessura com base no deslocamento sofrido.	65
Tabela 10 - Resultados globais obtidos para as duas estruturas.	66
Tabela 11 - Deformação no tempo para os dois ensaios a 10014mm/s.....	67
Tabela 12 - Modo de colapso ao longo do tempo para os dois ensaios a 17777 mm/s..	69
Tabela 13- Comparação de resultados obtidos nos ensaios a 10014mm/s.	71
Tabela 14 - Comparação do modo de colapso no tempo para os dois ensaios a 10014mm/s.	72
Tabela 15 - Comparação de resultados obtidos nos ensaios a 17777mm/s.	74
Tabela 16 - Comparação da deformação no tempo para os dois ensaios a 17777mm/s.	75
Tabela 17 - Características geométricas da estrutura de 1.14mm de espessura.	77
Tabela 18 - Características geométricas da estrutura de 1.045mm de espessura.	77

Nomenclatura Utilizada

$\dot{\epsilon}$ - Taxa de deformação uniaxial.

σ'_0 - Tensão uniaxial dinâmica.

σ_0 - Tensão uniaxial estática.

D, p - Constantes do material para equação de Cowper - Symmonds.

P_m - Carga média.

E_a - Energia absorvida.

δ_f - Deslocamento final (deformação total).

P_{max} - Carga máxima de compressão.

η - Eficiência da estrutura para absorção de energia.

A - Área da secção tubular.

σ_1 - Tensão característica do material (tensão de cedência).

S_e - Energia específica.

D_a - Energia total absorvida.

m - Massa.

F - Força.

a - Aceleração

Δt - Intervalo de tempo.

Δx - Distância entre nós.

ρ - Densidade.

c - Velocidade do som.

E - Módulo de elasticidade.

σ_y - Tensão de cedência.

σ_x - Tensão de ruptura.

ANSR - Autoridade Nacional Segurança Rodoviária.

DEM - Departamento de Engenharia Mecânica.

LEM - Laboratório de Engenharia Mecânica.

UM - Universidade do Minho.

Euro NCAP - European New Car Assessment Programme's

MEF - Método dos Elementos Finitos

MBD - (do Inglês – Multi Body Dinamic), Dinamica Multi Corpo.

LSTC - Livermore Software Technology Corporation.

1. Introdução

Actualmente verifica-se um aumento de dia para dia das velocidades praticadas nos automóveis, o que infelizmente, por vezes se traduz num aumento da sinistralidade. De acordo com o relatório anual da Autoridade Nacional Segurança Rodoviária (ANSR-extinta Direção Geral de Viação), em 2010, o número verificado de acidentes com vítimas foi superior para as colisões, seguindo-se dos despistes e dos atropelamentos (figura 1). Dentro da categoria das colisões, o índice de gravidade foi superior para as frontais, como se pode verificar na figura 2. Isto significa que, o número de vítimas mortais sobre o número de acidentes verificados foi superior para os impactos frontais.

2010: Sinistralidade segundo a natureza

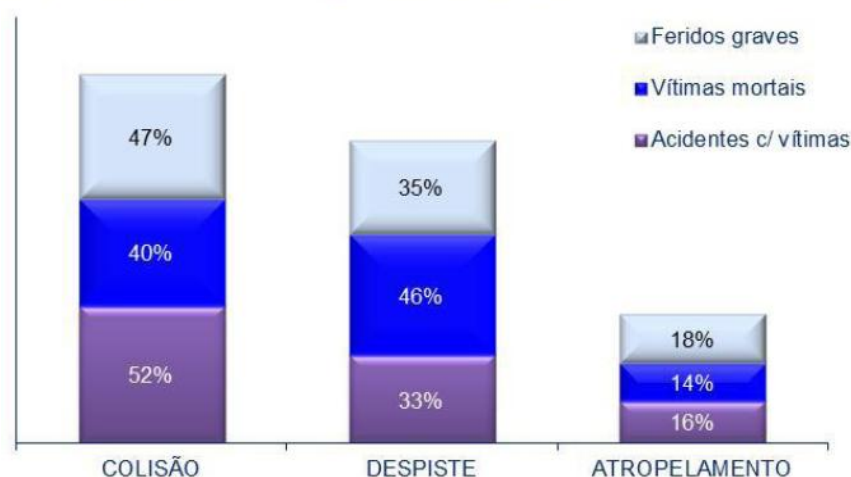


Figura 1 - Gráfico sinistralidade segundo a natureza do acidente em 2010 [1].

	Acidentes c/ vítimas		Vítimas mortais		Feridos graves		Feridos leves		Total de vítimas		Índice de gravidade	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Colisão	18148	18251	330	298	1226	1229	24587	24818	26143	26345	1,8	1,6
Choque em cadeia	624	636	1	11	12	27	943	1006	956	1044	0,2	1,7
Colisão com fuga	434	390	4	2	31	15	488	429	523	446	0,9	0,5
Outras situações	1671	2078	26	16	83	78	2180	2629	2289	2723	1,6	0,8
Col. c/ veic./obst. na faixa rodagem	1186	1306	16	19	72	62	1521	1658	1609	1739	1,3	1,5
Colisão frontal	3560	3343	141	100	474	470	5419	5268	6034	5838	4,0	3,0
Colisão lateral	6993	6795	99	106	420	430	9137	8831	9656	9367	1,4	1,6
Colisão traseira	3680	3703	43	44	134	147	4899	4997	5076	5188	1,2	1,2

Figura 2 - Dados sobre colisões ocorridas em Portugal no ano 2010 [1]

De modo a reduzir o impacto causado nos ocupantes assim como os encargos financeiros adjacentes a esta calamidade, os fabricantes tem vindo a investir mais no desenvolvimento e estudo das estruturas dos seus veículos, entrando em consideração com os requisitos mínimos da resistência ao choque que uma estrutura terá que possuir, de forma a apresentar um comportamento ao choque aceitável – *Crashworthiness*.

As figuras 3 e 4 procuram ilustrar a importância do estudo da absorção de energia de um impacto frontal, em estruturas de automóveis. Neste caso é apresentada a deformação da longarina frontal de um veículo de construção moderna (figura 3), onde se pretende a obtenção da máxima absorção de energia de impacto, através de deformação plástica. O objectivo principal será evitar o que se ilustra na figura 4, onde claramente o condutor sofreria danos físicos graves como consequência do impacto frontal.

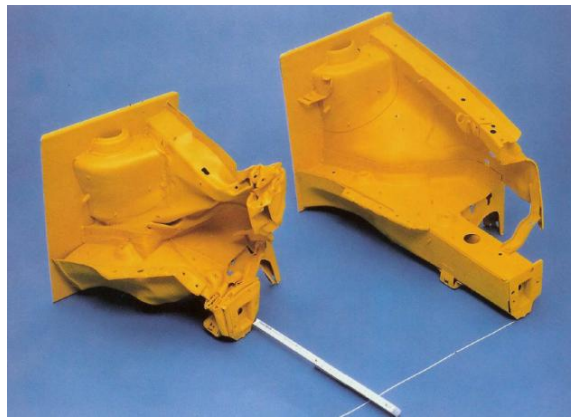


Figura 3 - Deformação de uma longarina frontal num veículo moderno [2].



Figura 4 - Deformação ocorrida em modelo real num ensaio experimental [3].

Com o avanço tecnológico, surgem com bastante frequência novas soluções e ideias para sistemas de absorção da energia resultante de um impacto para automóveis. Isto é, existe cada vez mais uma preocupação no desenvolvimento de dispositivos que visam a segurança de quem os utiliza.

Por outro lado, a redução do peso da estrutura dos veículos tem-se tornado numa das maiores preocupações no mundo da indústria automóvel. De facto, reduzir o peso da estrutura dos automóveis provocará uma diminuição do consumo de combustíveis e, consequentemente, uma diminuição das emissões poluentes. Estudos teóricos revelam que uma redução de 100kg no peso do automóvel, pode representar uma economia de 0,2 a 0,5l de combustível a cada 100km, para um mecanismo de propulsão normal e dependendo do cenário de utilização [4]. A figura 5 pretende ilustrar a relação entre as emissões de CO₂ e o peso base do automóvel, para o mercado europeu, bem como a meta traçada pela União Europeia [4].

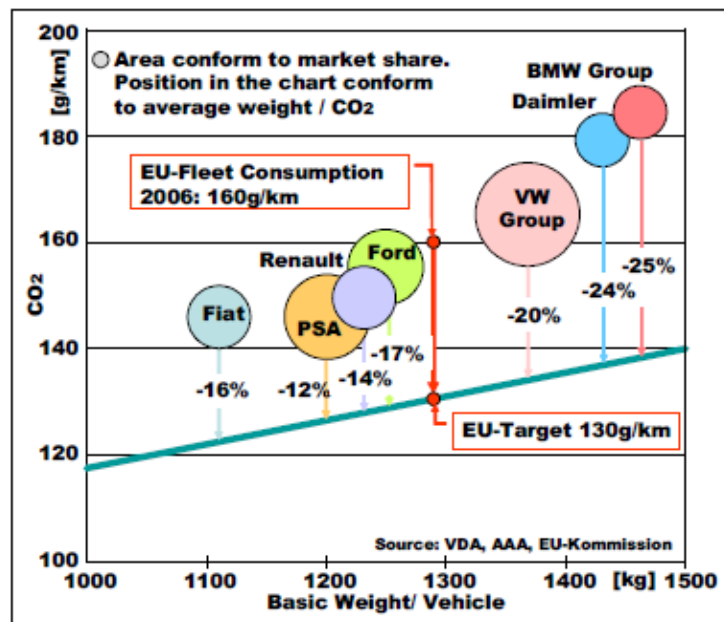


Figura 5 - Relação entre as emissões de CO₂ e o peso do automóvel [4]

No entanto, até ao momento, reduzir a espessura de um componente, implicaria obrigatoriamente a utilização de materiais mais resistentes de custo industrial mais elevado. De forma a contrariar este facto, surge a necessidade da utilização de técnicas

alternativas de dimensionamento das estruturas, recorrendo-se a novas estratégias e dispositivos de absorção de energia.

Estes dispositivos têm como objectivo principal minimizar os efeitos de uma solicitação ao impacto, nos ocupantes do veículo, reduzindo a energia de impacto sentida por estes. Desta forma os dispositivos são dimensionados de forma a absorverem o máximo de energia possível durante a colisão, ajudando a reduzir ou eliminar a ocorrência de danos pessoais, podendo mesmo ser decisivos para salvar as vidas dos passageiros.

Pode-se classificar os dispositivos de absorção de energia em dois grupos [5]:

- i. Reversíveis**
- ii. Irreversíveis**

Os reversíveis caracterizam-se por, como o próprio nome indica, absorver e restituir a energia no impacto, não sofrendo danos irreversíveis na sua estrutura. Os cilindros hidráulicos e os amortecedores elásticos constituem dois exemplos deste tipo de mecanismos.

Por outro lado os irreversíveis absorvem a energia do impacto, deformando-se de forma permanente, como é o caso das estruturas tubulares de paredes finas com secção transversal circular, que tem como particularidade a sua elevada capacidade de absorção de energia e facilidade de construção, representando por isso o mecanismo mais utilizado para esse efeito.

No desenvolvimento deste tipo de mecanismos, pode-se recorrer a ensaios experimentais, bem mais dispendiosos que os numéricos, onde se podem comparar os resultados obtidos.

O ensaio experimental de uma colisão mais conhecido, por ser o mais próximo da realidade, é conhecido por *crash-test* (figura 6). Neste ensaio, utilizam-se modelos reais de veículos, disponibilizados pelas marcas (no caso da agência Euro NCAP), os quais são submetidos a diferentes colisões, sendo-lhes atribuída uma classificação final consoante a sua prestação em termos de segurança dos possíveis ocupantes. Para simular a presença desses ocupantes utilizam-se Dummies (figura 7) – modelos feitos à

imagem de um ser Humano com medidas padrão, adultos e crianças, e incorporação de instrumentação para medição de carga, aceleração, etc. A nível europeu, existe a *Euro NCAP* que é uma agência responsável por efectuar testes de colisões na maior parte dos veículos comercializados neste continente.



Figura 6 - Crash-test agência Euro NCAP BMW serie 3 de 2005 [6]



Figura 7- Dummie adulto concebido para impactos frontais [7]

A nível académico e laboratorial, o ensaio mais recorrente é conhecido por *Drop Test* (figura 8), onde se utiliza apenas o componente (ou uma aproximação ao mesmo) a estudar como amostra. Essa amostra vai ser submetida a uma colisão com um elemento móvel que possui uma determinada massa, libertado a uma determinada altura acima da amostra. Pode utilizar-se também uma camara de alta velocidade, responsável por

gravar os resultados em vídeo, sendo posteriormente analisados em *software* específico de *tracking*. Este tipo de *software* consegue seguir um ponto de referência calculando variações de velocidade, tempo e aceleração durante um ensaio de impacto.



Figura 8 - Torre de queda de peso (Drop test) do laboratório de Ensaio e Materiais da Universidade do Minho [8]

Convém referir que é frequente a execução de um ensaio experimental com realização prévia de ensaios numéricos de modo a prever o comportamento das estruturas em situações de impacto. Os fabricantes de veículos recorrem sistematicamente a ensaios numéricos, utilizando sofisticados programas de cálculo. Só posteriormente submetem os seus mecanismos a ensaios experimentais, de modo a compararem resultados.

Neste trabalho, dá-se ênfase a um mecanismo de absorção de energia do tipo irreversível e consiste no estudo de simulação numérica do comportamento ao impacto de uma estrutura tubular de parede fina, consistindo esta numa aproximação a uma longarina frontal de um automóvel. Esta estrutura terá secção transversal circular e será implementada pressurização interna como resposta a uma redução de espessura da parede. Assim sendo, o principal objectivo deste trabalho será provar, numericamente, que é possível obter um comportamento semelhante numa solicitação ao impacto para as mesmas condições (velocidade e massa de impacto iguais), de duas estruturas com espessuras de parede diferentes, sendo que a de espessura inferior terá pressurização interna, por forma a compensar a resistência mecânica inferior. Estuda-se portanto, o efeito da pressurização interna de uma estrutura tubular circular submetida a impacto axial.

Será apresentado um estudo numérico considerado como uma estratégia inovadora de absorção de energia por atribuição de deformação plástica na estrutura, aquando de impacto frontal.

A velocidade a que ocorre o impacto terá como referência um *Drop Test*, realizado nas instalações do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade do Minho, e um *crash-test* frontal típico realizado pela agência europeia Euro NCAP.

O material seleccionado para simular a estrutura tubular circular é o aço inoxidável austenítico da serie H400 (marca Nirosta®), devido ao seu elevado alongamento antes da rotura final e por ter sido utilizado como amostra num ensaio de tracção, realizado no laboratório de ensaio de materiais do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade do Minho (UM), tendo sido retirada a sua curva Carga vs Deslocamento. Esta curva será utilizada na definição do material aquando da simulação numérica.

A simulação numérica será realizada com *software* que tem por base o método dos elementos finitos (MEF) – LS-DYNA™.

Utiliza-se o LS-DYNA™, por ser considerado o mais utilizado pela indústria automóvel, possuindo ferramentas específicas para reproduzir matematicamente impactos envolvendo *dummies*, *air bags*, cintos de segurança, barreiras rígidas, entre outros.

Para este trabalho é particularmente interessante a simulação de uma barreira rígida, que colidirá com a estrutura tubular circular estudada.

Os principais objectivos da elaboração deste trabalho são:

- Estudar a influência da pressurização interna de estruturas tubulares de paredes finas, submetidas a solicitações de impacto axial, numa perspectiva de *crashworthiness*.
- Estudar a possibilidade de se diminuir a espessura de parede da estrutura, pressurizando-a internamente de forma a compensar a redução de material. Desta forma, reduz-se também o peso da estrutura. Nesta fase pretende-se obter a mesma resposta ao choque que no caso de não pressurização interna e de espessura de parede maior.

Este trabalho apresenta-se estruturado da seguinte forma:

No capítulo 1, fez-se uma introdução sobre a importância do desenvolvimento, nas estruturas dos veículos, de mecanismos responsáveis pela absorção da energia numa colisão, mantendo sempre presente a importância da redução do peso dos mesmos.

No capítulo 2, será apresentada uma revisão bibliográfica, em que se apresentará informação relacionada com mecânica de impacto e absorção de energia, Crashworthiness, Ensaios experimentais de impacto (Drop test e crash-test), simulação numérica (LS-DYNA™) e será reservado ainda um subcapítulo para o aço inoxidável austenítico da serie H400.

No capítulo 3, é descrita a metodologia utilizada para a construção do modelo numérico que será alvo da simulação. Descrevem-se ainda os parâmetros a controlar e os dados a retirar no final do ensaio.

No capítulo 4, serão apresentados os resultados obtidos na simulação numérica, bem como uma discussão sobre os mesmos.

No capítulo 5, constarão as conclusões retiradas com este estudo e algumas recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Absorção de Energia de Impacto por Deformação Plástica

O estudo do comportamento ao impacto de estruturas e componentes tem recebido considerável atenção nos últimos anos. Este campo é de particular interesse para o projecto de todos os tipos de veículos (automóveis, autocarros, comboios, aviões, navios, etc.), para o transporte de passageiros e mercadorias.

A importância dos estudos de impacto recebeu atenção pública devido aos *crash-test* realizados pelo Euro NCAP (European New Car Assessment Program) e amplamente divulgada por fabricantes de automóveis [8].

Os mecanismos de absorção de energia têm como finalidade controlar a energia aquando de um impacto e consequentemente proporcionar uma segurança máxima aos ocupantes do meio de transporte.

Diversos dispositivos têm vindo a ser desenvolvidos de modo a dissiparem a energia através de diferentes formas, nomeadamente por [8]:

- Atrito;
- Rotura;
- **Deformação Plástica;**
- Extrusão;
- Movimento de fluido (mecanismos hidráulicos)
- Etc.

Aquando o decorrer de uma colisão, ocorrem grandes velocidades nas estruturas durante o processo de deformação associado a esse impacto, ocasionando uma reacção diferente do material de acordo com a variação da deformação ao longo do tempo – taxa de Deformação. Contrariamente aos efeitos de inércia, o efeito da velocidade de deformação faz-se sentir de forma pronunciada mesmo a baixas velocidades de impacto e como tal deve ser levado em consideração [8,9].

Diferentes modelos podem ser utilizados para esse efeito, sendo que uma das leis mais simples e mais utilizada em cálculos analíticos e numéricos é atribuída a Cowper e Symmonds [8]. Esta lei é apenas válida para materiais metálicos e é expressa por:

$$\dot{\varepsilon} = D \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma_0} - 1 \right)^p, \quad \sigma'_0 \geq \sigma_0, \quad (1)$$

Onde $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação uniaxial, σ'_0 e σ_0 são a tensão uniaxial dinâmica e estática, respectivamente; D e p são constantes do material. O cálculo das constantes pode ser efectuado escrevendo a equação (1) da seguinte forma:

$$\ln \dot{\varepsilon} = p \ln \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma_0} - 1 \right) + \ln D, \quad (2)$$

Que representa a equação de uma recta $\ln \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma_0} - 1 \right)$ Versus $\ln \dot{\varepsilon}$. O parâmetro p é o declive dessa recta enquanto a intersecção da ordenada é $\ln D$. A equação (1) é também muitas vezes apresentada por:

$$\frac{\sigma'_0}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{1/p}, \quad (3)$$

As constantes D e p podem também ser retiradas de informação já existente para diferentes materiais, tal como se indica na tabela 1.

Tabela 1- Constantes da equação de Cowper e Symmonds para diferentes materiais [7,8].

Material	D (s^{-1})	p
Aço macio ^[8]	40.4	5
Liga de alumínio ^[7]	6500	4
α – titânio (Ti 50Al) ^[7]	120	9
Aço inoxidável 304 ^[7]	100	10
Aço macio ^[7]	1150	7.75

Assim sendo, um dos métodos mais simples e, consequentemente, mais utilizado de absorção de energia de impacto utiliza a dissipação da mesma por deformação plástica

na estrutura. Por esse motivo, este trabalho foi realizado tendo em conta esse princípio de dissipação de energia.

2.2. Estruturas Tubulares de parede fina

Geometrias tubulares de parede fina são as mais utilizadas em mecanismos de absorção de energia por deformação plástica, como se pode verificar na figura 9. Tal facto deve-se a estas possuírem um comportamento plástico favorável quando submetidas a cargas axiais.

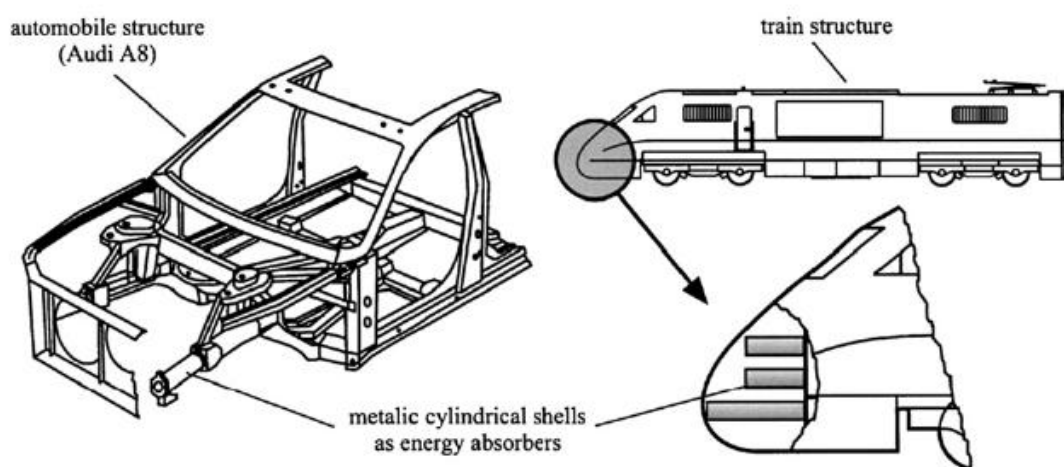


Figura 9 - Utilização de estruturas tubulares de parede fina em estruturas de veículos [11].

Estruturas tubulares de secção transversal circular, sujeitas a compressão axial, são das que mais prevalecem como componentes em sistemas de absorção de energia, uma vez que possibilitam uma deformação razoavelmente constante e têm uma elevada capacidade de absorção de energia, como se pode observar na figura 10, onde se compara a absorção de energia versus o rácio espessura/diâmetro entre estruturas tubulares circulares e rectangulares (outra das geometrias mais utilizada).

Comparando a compressão lateral com a compressão axial, o modo de impacto axial tem uma capacidade de absorção de energia específica que é aproximadamente dez vezes maior do que o mesmo tubo quando comprimido lateralmente, isto devido ao facto que durante o carregamento axial todo o material da parede do tubo cooperar na absorção de energia [12].

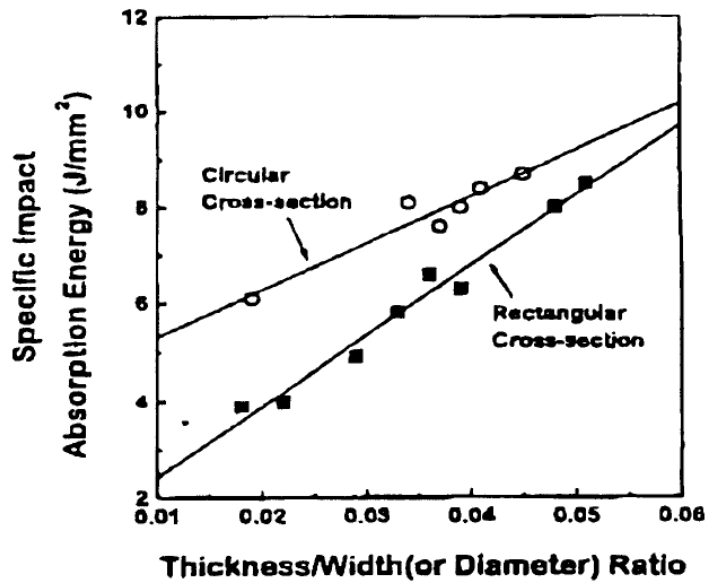


Figura 10 - Comparação entre seção transversal circular e retangular. [13]

2.2.1. Modos de colapso.

As estruturas tubulares de paredes finas, também conhecidas como cascas, podem apresentar duas classificações, mediante o tipo de resposta estrutural quando sujeitas a impacto axial, sendo elas [8]:

- i. Encurvadura dinâmica;
- ii. Encurvadura com colapso progressivo.

Estas designações estão associadas a dois fenómenos ilustrados na figura 11, onde se observa duas estruturas tubulares com seção transversal circular sujeitas a impacto axial. O tubo da esquerda foi atingido a alta velocidade e deformou-se ao longo de todo o seu comprimento correspondendo ao caso de encurvadura dinâmica, associada a fenómenos de inércia. O tubo à direita deformou-se de modo localizado após o impacto a uma velocidade relativamente baixa, correspondendo à encurvadura progressiva.

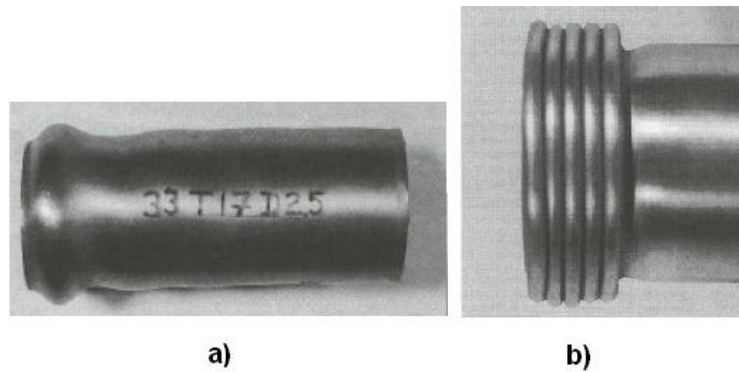


Figura 11 - Tubos circulares de parede fina sujeitos a impacto axial com diferentes velocidades. a) Encurvadura dinâmica; b) Encurvadura com colapso progressivo (modo colapso “Concertina”) [9].

Dentro do grupo da encurvadura com colapso progressivo, os tubos de parede-fina, normalmente fabricados pelo processo de extrusão, têm secções que podem entrar em colapso de sete formas distintas [12]:

- Concertina
- Diamante
- Euler
- Concertina/Diamante
- Concertina Simultânea
- Diamante Simultâneo
- Inclinação do eixo do tubo

Na figura seguinte estão representados alguns modos de colapso, mais frequentes para estruturas tubulares de paredes fina.



Figura 12 - Diversos tipos de colapso: a) Concertina; b)Diamante; c)Concertina/ Diamante; d) Euler; e) Inclinação do eixo do tubo [12].

Na concepção de estruturas para crashworthiness, em particular componentes submetidos a impacto axial, é importante obter modos de colapso que maximizem a absorção da energia de impacto. A encurvadura com colapso progressivo, caracterizada pela progressiva formação de “dobras” em modo concertina, é preferível à de tipo Euler [8].

Na prática, os ensaios de compressão de estruturas tubulares são considerados como o principal método experimental para avaliar a absorção de energia deste tipo de geometrias [8]. Esses ensaios permitem determinar carga média e carga máxima e realizar uma análise qualitativa do comportamento que incluiu o número de “dobras” formadas, o seu tipo e o modo de colapso global. O registo de curvas força deslocamento pode ser integrado para determinar energia absorvida e a força média de esmagamento, calculada por:

$$P_m = \frac{E_a}{\delta_f} , \quad (4)$$

onde δ_f é o deslocamento final e E_a a energia absorvida. A carga média é uma indicação da capacidade de absorção de energia de uma estrutura, quando comparada com o deslocamento axial necessário para a absorver.

A figura 13 representa uma curva típica Carga vs Deslocamento do modo de colapso em concertina [14].

A força máxima de compressão, P_{max} , pode ser determinada em ensaios estáticos, mas para ensaios dinâmicos de impacto o seu valor é discutível, considerando os efeitos de inércia e variações existentes no sinal proveniente de células de carga.

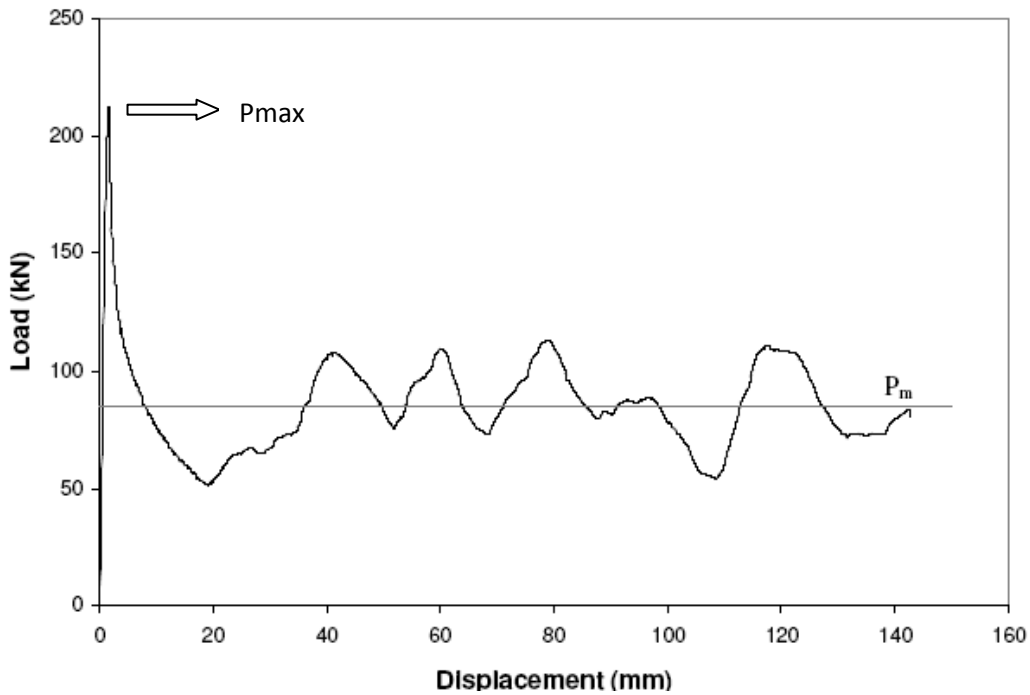


Figura 13 - Curva típica Carga vs Deslocamento para um ensaio de compressão axial de uma estrutura tubular, com indicação da carga média P_m [14].

Em alguns modelos de previsão teórica (numérica) ou na comparação de resultados experimentais podem utilizar-se parâmetros adimensionais baseados na carga média. Um desses parâmetros é a eficiência de uma estrutura para absorver energia de um impacto, sendo definido por [9]:

$$\eta = \frac{P_m}{A \sigma_1}, \quad (5)$$

onde P_m é a carga média, A é a área da secção tubular e σ_1 é uma tensão característica que poderá ser a tensão de cedência do material que compõe a estrutura.

Por outro lado, a eficiência de qualquer dispositivo de absorção de energia pode ser avaliada de diferentes formas, de modo a considerar uma vasta gama de aplicações. Uma medida da eficiência é considerar a energia específica (Se), definida como a energia absorvida por unidade de massa:

$$S_e = \frac{D_a}{m} , \quad (6)$$

em que D_a é a energia total absorvida e m é a massa do dispositivo de absorção de energia.

2.2.2. Iniciadores de Deformação.

Na concepção de uma estrutura não pode existir qualquer tipo de imperfeições, uma vez que essa envolve uma idealização, um estudo de geometria e de material, bem como de um processo de montagem, isto é, tudo é pensado com o máximo rigor para que a mesma seja concebida para ser perfeita. Entenda-se como perfeita, uma estrutura que desempenha as funções para a qual foi concebida, quando utilizada em condições normais, previstas antecipadamente aquando a sua idealização.

Por outro lado, sabendo que a encurvadura com colapso progressivo resulta de impactos axiais de, relativamente, baixa velocidade e num impacto de um veículo automóvel atingem-se velocidades necessariamente superiores, não seria possível obter uma resposta deste tipo sem que nada fosse alterado a nível estrutural. Surge então a necessidade da implementação de uma estratégia que visa garantir uma resposta de colapso progressivo por parte da estrutura submetida ao impacto, de forma a maximizar a absorção de energia e consequentemente contribuir para uma melhor salvaguarda dos seus ocupantes. Os iniciadores de deformação, conhecidos vulgarmente por *triggers*, têm como um dos propósitos esse objectivo.

Os iniciadores de deformação consistem em atribuir, propositadamente, imperfeições na estrutura, isto é, introduzir zonas estruturalmente críticas susceptíveis de iniciarem a deformação resultante de um impacto (carga axial no caso de estruturas tubulares). Com esta estratégia, o responsável pela concepção da estrutura, será capaz de prever o modo de colapso da mesma. Isto é, já que irá, ou poderá ocorrer, inevitavelmente um impacto o projectista terá que definir por onde se iniciará e como se propagará a deformação, de modo a maximizar a absorção de energia de impacto, protegendo os ocupantes do veículo – colapso progressivo.

Os *triggers* contribuem ainda para uma diminuição da força máxima de compressão. A profundidade, forma e posição do *trigger* afectam o modo de colapso bem como contribuem para controlar a força máxima de compressão, isto é, ajustando os parâmetros correspondentes à imperfeição pode-se controlar a força máxima de compressão bem como o modo de colapso pretendido.

Para cada situação podem-se utilizar diferentes iniciadores de deformação, o que significa que cada caso é um caso e que se deve estudar previamente os parâmetros do iniciador a utilizar, sempre com o objectivo de **maximizar a absorção de energia** bem como **diminuir a força máxima de compressão**. A simulação numérica constitui uma boa forma de estudo dos *triggers*, onde se poderá testar antecipadamente a eficácia dos mesmos para a estrutura em causa. A estratégia utilizada neste trabalho passou por submeter inicialmente a estrutura ao impacto axial sem os iniciadores, verificar onde se iniciava a deformação, e marcar esses pontos. O passo seguinte passou por inserir uma imperfeição nos mesmos, nomeadamente um deslocamento de 1mm (apenas em 3 pontos em 2 lados simétricos da estrutura) como se pode verificar na figura 14.

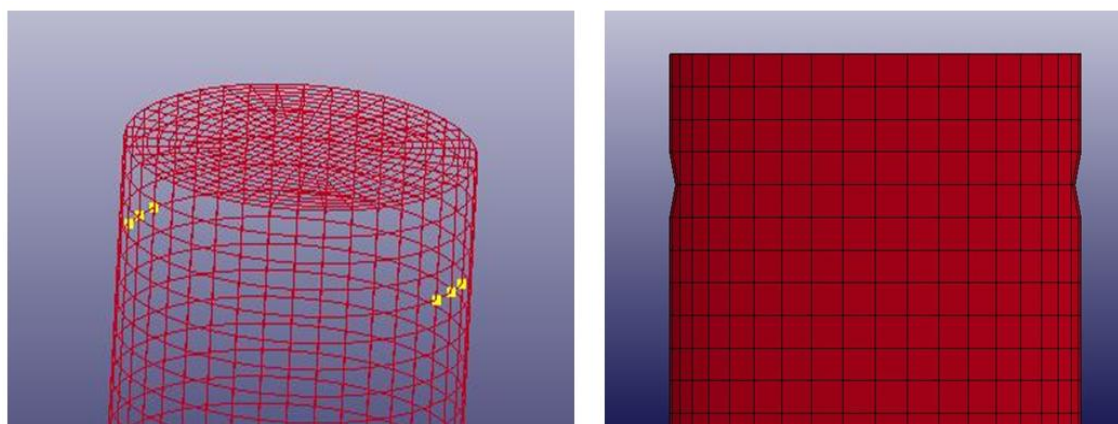


Figura 14 - Construção de Iniciadores de Deformação.

A figura 15 pretende ilustrar as diferenças visuais do colapso observado num ensaio de impacto axial sem recurso à utilização de *triggers* e outro em que se utilizam. Vê-se claramente que a utilização de *triggers* permite uma deformação maior (maior absorção de energia) e mais homogénea.

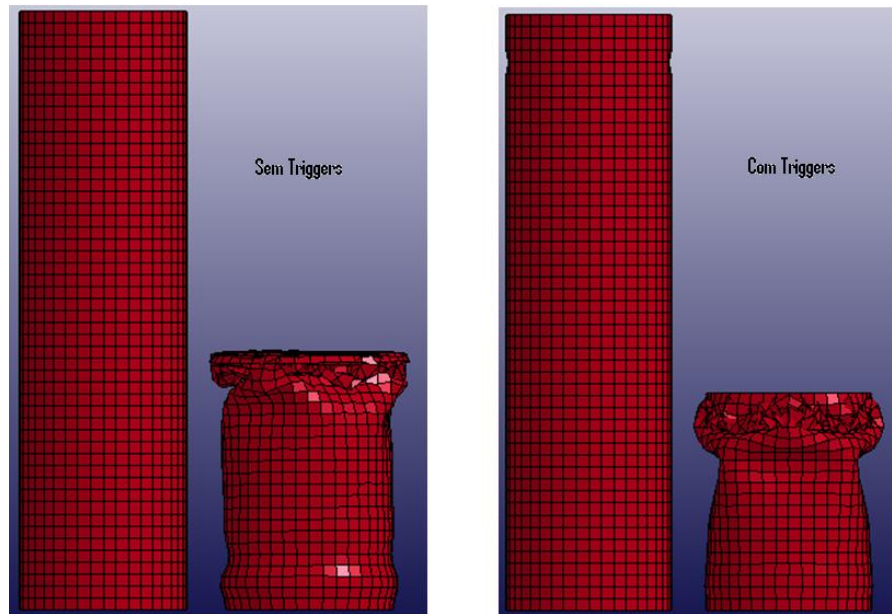


Figura 15 - Ensaio sem *Triggers* vs Ensaio com *Triggers*.

As figuras 16 e 17, representam a curva Carga vs Deslocamento obtidas no ensaio sem *Triggers* e com *Triggers*, respectivamente. O ensaio sem triggers obteve resultados completamente aleatórios, já que não foi possível prever o início e o modo de propagação da deformação infligida pelo impacto.

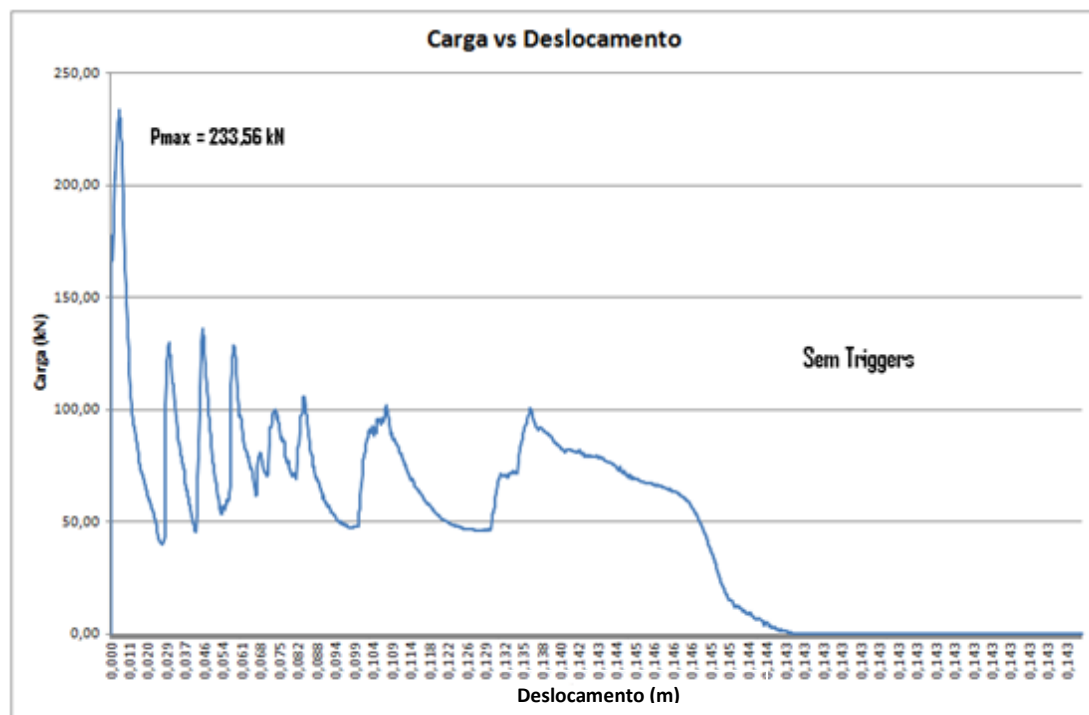


Figura 16 - Curva Carga vs Deslocamento ensaio sem triggers.

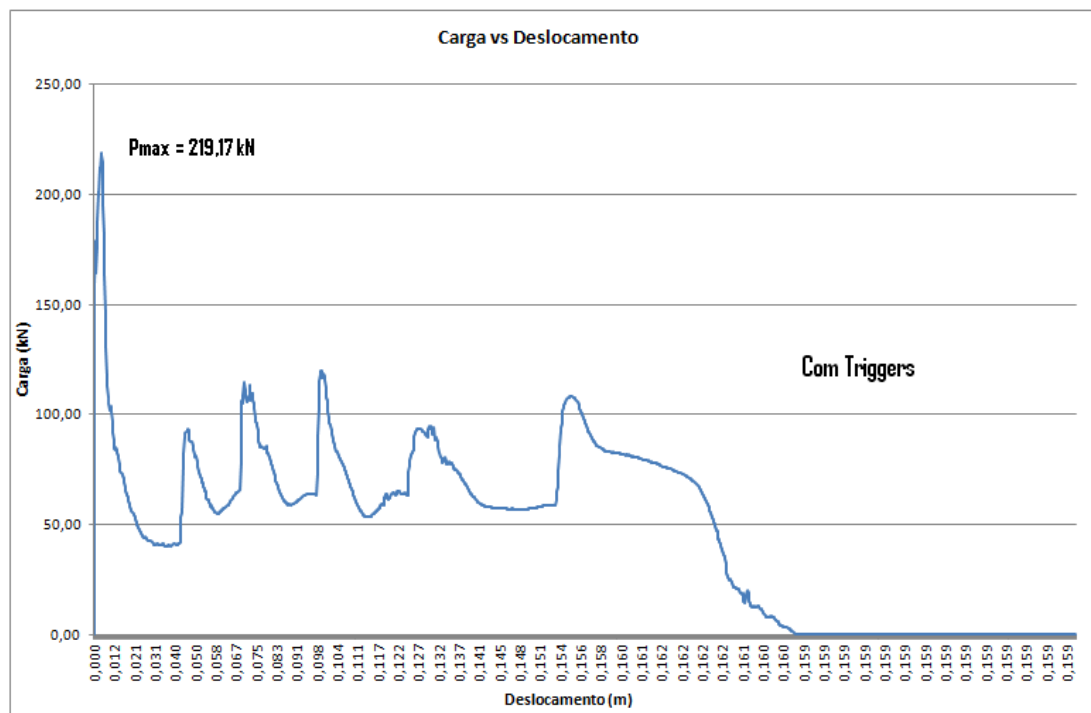


Figura 17 - Curva Carga vs Deslocamento ensaio com triggers.

Cada pico do gráfico representa carga necessária para a formação de uma “dobra” no modo de colapso progressivo. De salientar que o primeiro pico é conhecido como carga máxima, que se traduz pela carga necessária para a formação da primeira dobra. Verifica-se que com a utilização dos triggers esse valor de carga máxima baixa, já que a estrutura apresenta imperfeições, sendo conhecidas como zonas estruturalmente mais fracas- passíveis de iniciar a deformação.

2.3 Crashworthiness

Crashworthiness, também conhecido como resistência ao choque, pode ser definido como a capacidade de uma estrutura de um veículo, bem como dos componentes que a constituem, de proteger os seus ocupantes aquando de um impacto [16].

Actualmente, nos veículos modernos são anunciados dois tipos de dispositivos de segurança: os activos e os passivos. De uma maneira geral, todos os dispositivos instalados no veículo para evitar um acidente são considerados equipamentos

de segurança ativa e os equipamentos utilizados para minimizar as consequências do mesmo são chamados de dispositivos de segurança passiva.

Na perspectiva do Crashworthiness, interessam apenas os dispositivos de segurança passiva já que estes só entram em acção aquando o acidente, visando diminuir a gravidade do acontecimento para os passageiros, indo de encontro ao principal objectivo deste tema. Estes dispositivos são exigidos em todos os veículos e são responsáveis por absorver ou dissipar a energia cinética ou de impacto quase sempre de forma irreversível (exceptuando os dispositivos de absorção de energia reversíveis – impactos geralmente a baixa velocidade). A resistência ao choque pressupõe que o veículo possa absorver a energia de um impacto através de deformação plástica da sua estrutura, garantindo ainda espaço suficiente para a proteção dos seus ocupantes.

Ambrósio e co-autores [15] apresentam uma revisão abrangente dos temas actuais e tendências futuras de resistência ao choque de sistemas de transporte. Segundo eles, a resistência ao choque dos veículos envolve essencialmente duas grandes áreas de estudo [15]:

- i. Comportamento da estrutura e seus componentes;
- ii. Cinemática dos seus ocupantes e biomecânica da lesão.

Este trabalho será focado na primeira grande área de estudo mencionada pelos autores referidos, consistindo no estudo do comportamento ao impacto de um componente estrutural de um veículo automóvel, nomeadamente de uma longarina frontal.

Actualmente, a resistência ao choque diz-nos que devemos ter em conta [16]:

- A estrutura do veículo deve incluir zonas de colapso progressivo para absorver parte da energia cinética do acidente.
- Os veículos devem manter a integridade do compartimento dos passageiros e simultaneamente controlar o pulso de desaceleração do impacto.
- A reconstrução de acidentes e análises dos mesmos devem fornecer informações sobre o desempenho da segurança

- A resistência ao choque do veículo é avaliada em quatro modos distintos de impacto: frontal, lateral, traseiro e de capotamento.
- Deve-se adequar o projecto de chassis para as diferentes estratégias de motorização de veículos, nomeadamente veículos de motor à frente, ao centro e atrás.

Diz-se que uma estrutura automóvel satisfaz os requisitos do *crashworthiness* quando, atendendo as cargas de funcionamento, é capaz de se deformar plasticamente para absorver a energia daí resultante num curto intervalo de tempo (na ordem dos milissegundos).

2.4 Estruturas Adaptativas para Crashworthiness

Uma estrutura adaptativa para *crashworthiness* é aquela que pode alterar as suas propriedades, tais como a rigidez, dependendo da configuração e da gravidade do impacto experimentado, de modo a otimizar o seu desempenho e assim minimizar o risco de lesão para os ocupantes do veículo [16]. Elas diferem das estruturas *standard*, cuja capacidade de absorção de energia de um impacto varia passivamente de acordo com a gravidade do mesmo.

Muitas pesquisas têm sido realizadas em estruturas adaptativas focadas na sua concepção técnica, capacidade operacional, métodos de actuação e tecnologia de suporte necessárias. No que diz respeito aos métodos de actuação, na utilização deste tipo de estruturas torna-se imprescindível a utilização de sistemas de detecção prévia do impacto, de modo a maximizar o tempo disponível para estas se adaptarem devidamente. Essa detecção prévia é realizada com recurso à utilização de diversos sensores instalados na estrutura do veículo.

Na verdade, hoje em dia a segurança dos veículos tem sido aprimorada com o aproveitamento da informação recolhida pelos sensores instalados nas estruturas dos mesmos. Esses sensores têm a capacidade de detectar um impacto, evitando-o (segurança activa) ou minimizando as consequências do mesmo nos ocupantes do veículo (segurança passiva). Os sensores concebidos para segurança activa recolhem constantemente informação do ambiente e transmitem-na para o controlador central, que decidirá que ordem dará para os actuadores (dispositivos de segurança activa instalados no veículo) em caso de acidente iminente. Por sua vez os sensores de segurança passiva,

detectam o acidente e accionam os mecanismos necessários para minimizar os danos causados nos ocupantes.

Os dispositivos de segurança passiva instalados nos veículos podem ser estruturas pensadas para se adaptarem à intensidade do choque, com o objectivo de melhorar a sua resistência ao choque. São por esse motivo, chamadas de estruturas adaptativas para crashworthiness.

Têm-se feito imensos progressos relativamente ao melhoramento de segurança dos ocupantes dos veículos, em que se utilizam as informações adquiridas pelos sensores, tais como:

- Fecho automático de vidros e do tecto de modo a minimizar o risco de objectos penetrarem no veículo;
- Pré-tensionamento dos equipamentos de retenção de passageiros (cintos de segurança);
- Reposicionamento dos bancos frontais em condições que garantam melhor segurança para os ocupantes no impacto;
- Sistemas de alerta com aviso sonoro e visual de impacto iminente, para que o condutor reaja atempadamente e trave;
- Travagem automática, impedindo a colisão ou minimizando as suas consequências (sistema PRE-SAFE®);
- Pressurização interna de estruturas com ou sem alteração da sua geometria inicial.

O sistema PRE-SAFE®, conceito introduzido em 2002 pela Daimler™ para a aplicação no Mercedes-Benz Classe S, constituiu um bom exemplo de segurança activa, já que foi o primeiro estudo efectuado com sucesso no âmbito de dotar o veículo da capacidade de prever e evitar um impacto frontal eminente ou minimizar os danos do mesmo. Este sistema utiliza a informação de um radar instalado na dianteira do veículo e funciona da forma descrita na figura 18 [17]:

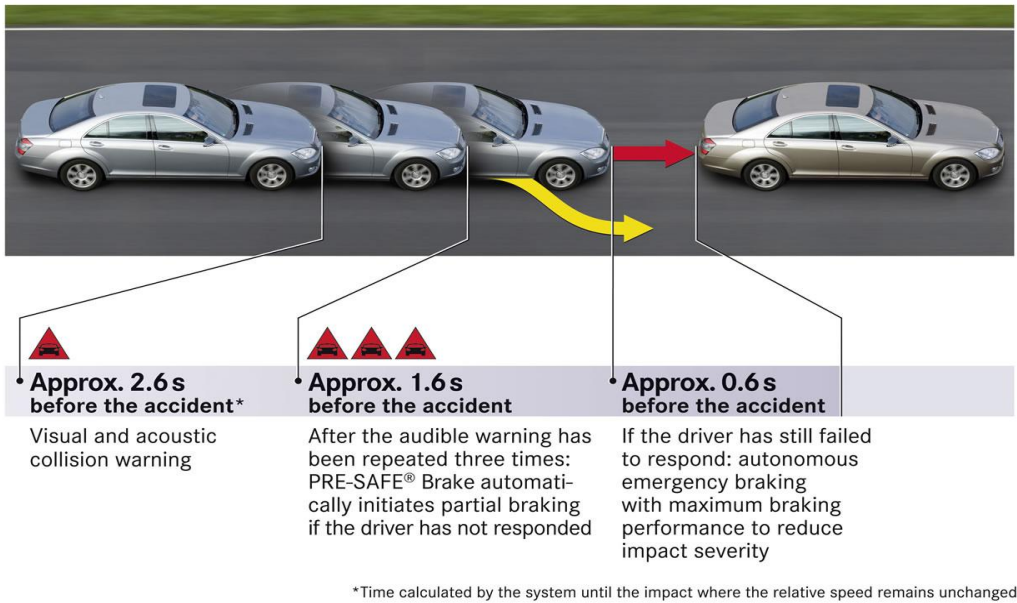


Figura 18 - Funcionamento do sistema PRE-SAFE® [15].

A figura seguinte ilustra o avanço tecnológico na área de auxílio à travagem no Mercedes-Benz Classe S, verificado ao longo dos últimos anos.

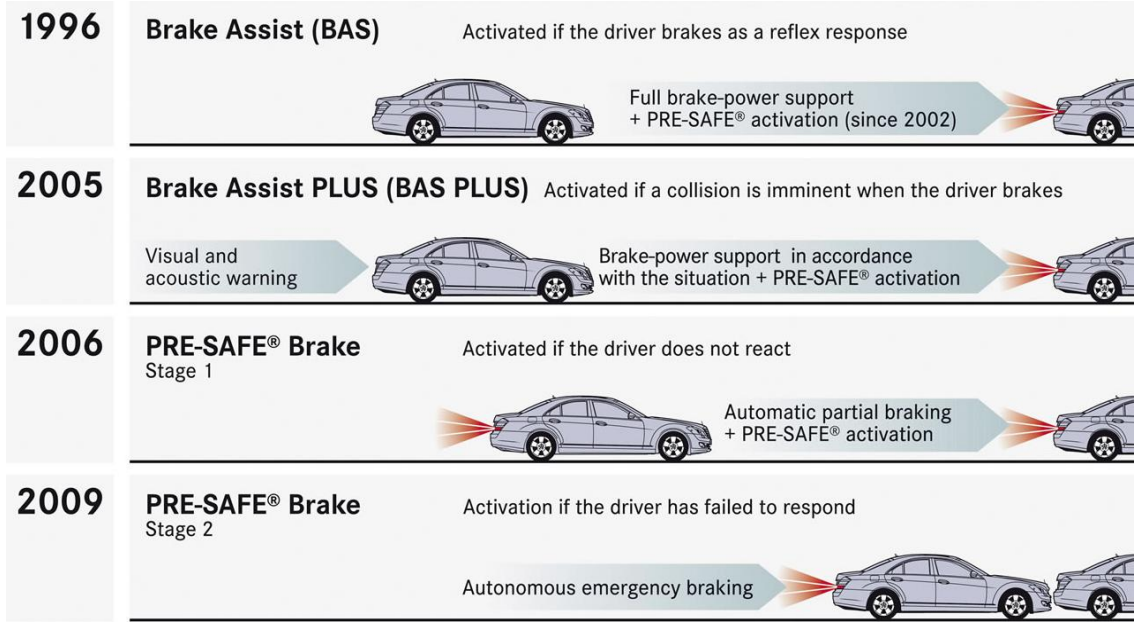


Figura 19 - Inovação no sistema PRE-SAFE® do Mercedes-Benz Classe S [15].

Para além da travagem automática, o sistema PRE-SAFE®, inclui ainda o fecho automático de vidros e do tecto, pré-tensionamento dos equipamentos de retenção de passageiros, reposicionamento dos bancos e os referidos sistemas de alerta sonoro e visual.

Por outro lado, infelizmente nem sempre se pode evitar o acidente pelo que, paralelamente têm sido feitos grandes desenvolvimentos na área da segurança passiva sempre com o principal objectivo de minimizar as consequências do mesmo nos ocupantes dos veículos.

Em geral, a resistência ao choque da estrutura de um veículo pode ser melhorada com recurso a várias técnicas, sendo de particular interesse para este trabalho os estudos em que se recorre à pressurização interna de estruturas.

2.4.1-Pressurização Interna de estruturas

Os benefícios da pressurização de componentes frontais e laterais dos veículos têm vindo a ser avaliados nos últimos anos. De uma forma geral a pressurização é feita com recurso a geradores de pressão, sendo equiparado ao estado da arte da aplicação dos mesmos em *airbags*. Com os geradores de pressão, em apenas alguns milissegundos a pressão gerada no interior do componente pode atingir valores na ordem dos 20bar, sendo um valor referência para a grande maioria dos dispositivos *airbag* actuais. De acordo com as características do componente bem como do objectivo que se pretende, podem ocorrer duas possibilidades de resposta à pressurização por parte deste:

- i. Verifica-se uma variação da geometria inicial do componente;
- ii. A estrutura mantém a geometria inicial.

O principal objectivo das estruturas que alteram a sua geometria inicial quando pressurizadas imediatamente antes o impacto, é precisamente aumentarem o momento de inercia e, conseqüentemente, a absorção de energia do mesmo. Utilizam portanto o princípio que maior área deformada é equivalente a uma maior energia absorvida.

Por sua vez os dispositivos que mantêm a sua geometria inicial após a introdução da pressão, têm como intuito aumentar a sua resistência à deformação, nomeadamente a carga necessária para que se inicie a mesma. Contudo, estes podem ser desenvolvidos

para desempenharem exactamente a mesma função que um homólogo sem pressurização, mantendo assim a mesma capacidade de absorção de energia (geometria inalterada) mas com a vantagem de se poder utilizar uma espessura de parede menor, reduzindo o peso do componente. A pressão actuará como compensador da redução da espessura, elevando a sua resistência à deformação para valores idênticos dos praticados nos componentes mais espessos (mais pesados) e sem a pressão interna.

Na figura 20 está ilustrado um dispositivo que, quando detectada a possibilidade de ocorrência de impacto frontal, altera a sua geometria mediante a aquisição de pressão no seu interior, aumentando a área de deformação possível e, consequentemente, aumentando também a sua capacidade de absorver energia, uma vez que uma maior área deformada corresponderá a uma maior absorção da energia de impacto.



Figura 20 - Pára-Choques móvel para absorver mais energia cinética do impacto [4].

Outro exemplo de um dispositivo que envolve alteração da sua geometria inicial, é o caso do mecanismo desenvolvido pela Mercedes-Benz, que é utilizado para insuflar uma barra metálica no interior das portas do veículo, para a situação de impacto lateral (figuras 21, 22 e 23). Este mecanismo tem vindo a ser utilizado no Mercedes Research Vehicle ESF 2009.



Figura 21 - Insuflador de barra metálica de aplicação nas portas para impacto lateral [18].



Figura 22 - Vista de corte da barra metálica insuflável no Mercedes-Benz Research Vehicle ESF 2009, mecanismo pirotécnico à esquerda [18].

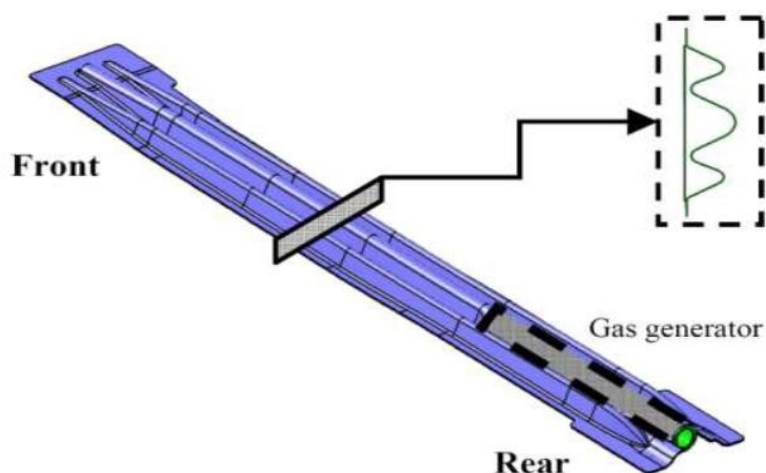


Figura 23 - Vista em pormenor da barra metálica insuflável [19].

As barras metálicas insufláveis têm como objectivo substituir os componentes de segurança das portas actuais que são normalmente feitos em aço com espessura considerável, por forma a reduzir o peso já que requerem uma espessura menor, enquanto se aumenta a performance global da estrutura em casos de impactos (dinâmicos) como em cenários do dia-a-dia.

Os principais parâmetros de concepção deste tipo de estrutura são [19]:

- Resistência Mecânica: Momentos de inercia comparáveis ao caso das portas de produção em serie (mecanismos actuais);
- Redução de peso;
- Acondicionamento melhorado (espessura de chapa menor);
- Melhoramento da performance de resposta a impacto (dinâmico).

O princípio de funcionamento pode ser descrito de uma forma muito simples: a estrutura expande de uma área de secção transversal pequena para uma maior quando pressurizada. Este efeito pode originar grandes benefícios como um melhor acondicionamento (ocupa menos espaço inicialmente), tamanho e peso, e aumento da capacidade de absorção de energia da estrutura (maior área para deformar).

A melhoria na redução do peso, já considerando o peso do elemento pirotécnico responsável pela criação da pressão, situa-se na ordem dos 20% comparativamente aos sistemas actuais de segurança para portas de produção em série.

A figura 24 procura ilustrar o funcionamento deste mecanismo de segurança passiva.



Figura 24 - Funcionamento da barra metálica insuflável [19].

Este mecanismo é accionado em resposta aos sensores colocados nas laterais do veículo e em apenas 20 a 30 milissegundos insufla completamente com uma pressão interna de 20bar. A secção transversal expandida possibilita uma melhor performance no impacto. A figura 25 mostra-nos os resultados obtidos na forma de uma curva Carga-Deslocamento para um estudo efectuado sobre este tipo de mecanismo, feito em aço Docol 1200 M com 0.7mm de espessura (ambas as chapas) e pressão interna de 20 bar [19].

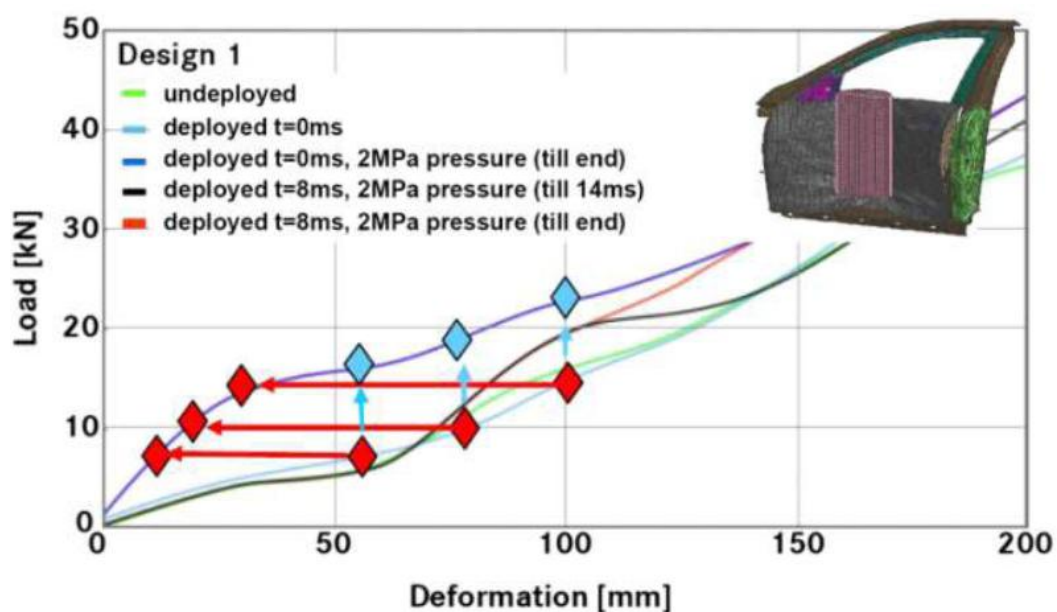


Figura 25 - Curva Carga-Deslocamento de estudo porta pressurizada [19].

A linha azul claro, representa a estrutura insuflada mas sem pressão interna.

As linhas azul-escuras, preta e vermelha representam diferentes estratégias de acionamento e duração da pressão interna de 20 bar.

Os losangos azuis ilustram o efeito do pré-carregamento, ou seja da introdução da pressão interna logo no instante inicial, verificando-se um aumento da carga no caso de se considerar pressão no instante zero.

Os losangos a vermelho mostram o efeito da pressão interna, efectivamente verifica-se uma redução já esperada do deslocamento.

No que respeita aos mecanismos de segurança passiva pressurizados que não variam a sua geometria inicial, temos outro exemplo vindo da Mercedes-Benz, nomeadamente o estudo da estrutura frontal do Mercedes Classe S (figura 26).

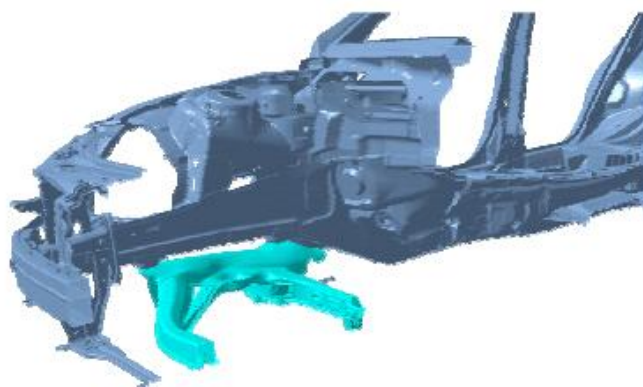


Figura 26 - Componente frontal pressurizado Mercedes-Benz [4].

Neste estudo foi realizada uma simulação numérica, utilizando o método explícito de elementos finitos do LS-Dyna™, sem que sejam considerados o motor e a estrutura inferior. O componente é em aço ZstE 340 com 1.75mm de espessura. Durante a simulação foi assumido que a pressão seria constante durante todo o processo de deformação. Os valores de pressão utilizados foram 5, 10 e 15 bar e os resultados obtidos podem ser observados na figura 27.

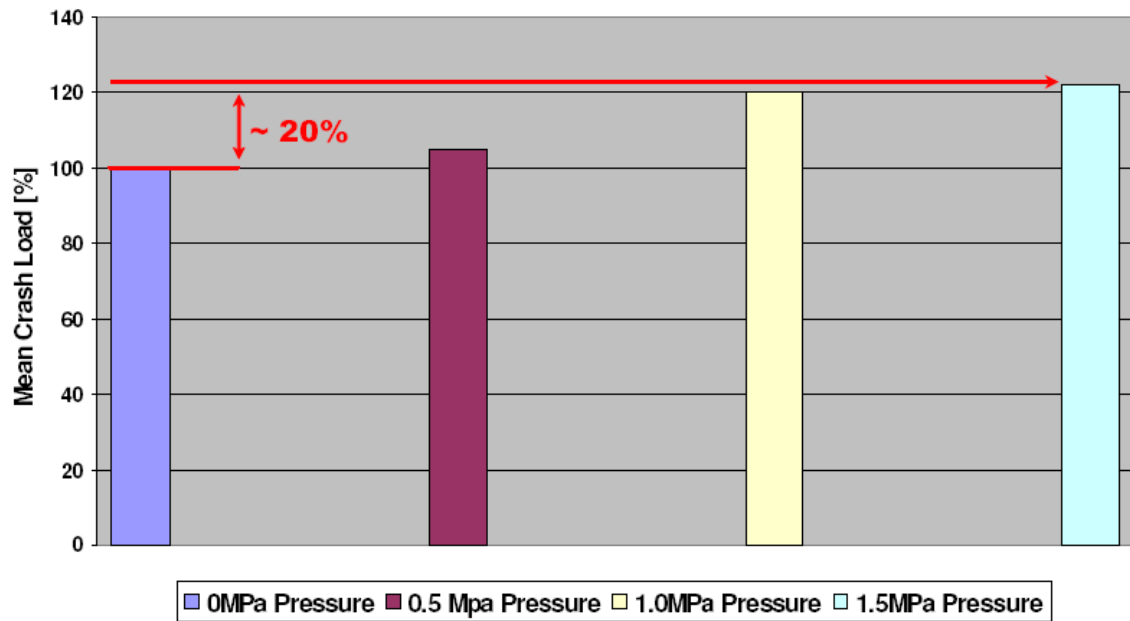


Figura 27 - Gráfico dos resultados obtidos na simulação numérica do componente frontal pressurizado do Mercedes-Benz Classe S [4].

Para valores de pressão de 15 bar, verificou-se um aumento da carga média de impacto de cerca de 20%. Estes resultados abrem portas para a oportunidade de teoricamente se poder reduzir a espessura da parede do componente em 20 a 30%, indo de encontro as recentes preocupações que a redução do peso dos componentes implica, sem prejuízo no âmbito do *crashworthiness*.

Para o presente trabalho será considerada a opção de não haver variação da geometria inicial da estrutura tubular circular aquando da sua pressurização, estudando-se valores para pressão interna inserida de 5 a 20 bar.

2.5 Ensaios Experimentais de Impacto

Actualmente existem vários tipos de ensaios experimentais que visam o estudo da mecânica do impacto, nomeadamente no desenvolvimento de novas estratégias de absorção de energia em estruturas concebidas para *crashworthiness*. Os ensaios experimentais mais conhecidos em todo mundo, devido à sua espetacularidade, são conhecidos por *crash-test*, onde se realizam testes de colisões com parâmetros bem definidos e que simulam cenários da vida real, utilizando-se modelos de veículos reais.

Como se pode prever, são ensaios bastante dispendiosos uma vez que não só requerem a destruição do veículo bem como são necessários sistemas de aquisição de dados bastante sofisticados. Existem várias agências que levam a cabo este tipo de ensaios um pouco por todo o mundo, onde se destaca a nível Europeu a agência Euro NCAP (**European New Car Assessment Programme's**).

No entanto existem outros tipos de testes experimentais, bem menos dispendiosos, que nos permitem obter informações válidas sobre um impacto, utilizando-se apenas o componente a estudar ou mesmo uma aproximação ao mesmo.

Numa perspectiva laboratorial ou académica, o ensaio mais recorrente é o Drop Test, onde se efectuam testes de impacto utilizando apenas uma massa suspensa a uma determinada altura que será largada sobre o componente em estudo. Este componente poderá ser o componente real utilizado no veículo ou uma aproximação ao mesmo. Convém referir que este ensaio, para além do benefício da utilização de apenas o componente a estudar, tornando-o menos dispendioso, continua a necessitar de meios de aquisição de dados sofisticados, normalmente utiliza-se a câmara de alta velocidade e um *software* específico de *tracking* para análise dos dados. Este tipo de *software* consegue seguir um ponto de referência calculando variações de velocidade, tempo e aceleração durante um ensaio de impacto

2.5.1 Euro NCAP

A Euro NCAP realiza crash-tests, oferecendo aos consumidores de automobilismo uma avaliação realista e independente do desempenho de segurança de alguns dos veículos mais populares vendidos na Europa. Esta agência foi fundada em 1997 por sete países Europeus, nomeadamente a França, Alemanha, Suécia, Holanda, Espanha, Reino Unido e Bélgica, bem como de organizações de automobilismo e de consumo.

Esta agência rapidamente se tornou um catalisador para incentivar melhorias de segurança significativas para o design de novos veículos.

Actualmente, todos os novos modelos de veículos tem que passar um certo número de testes de segurança antes de serem postos à venda. Esta imposição está protegida legalmente, mas essa mesma legislação contempla um estatuto mínimo de segurança

que todos os veículos devem possuir, incentivando no entanto e constantemente os fabricantes a excederem sempre esses requisitos mínimos.

Os principais testes impacto desenvolvidos pela agência europeia são [20]:

- Impacto Frontal;
- Impacto lateral com outro veículo;
- Impacto lateral com poste;
- Impacto Traseiro;
- Atropelamento de pedestres.

As figuras seguintes ilustram cada uma das situações de impacto estudadas pela agência.

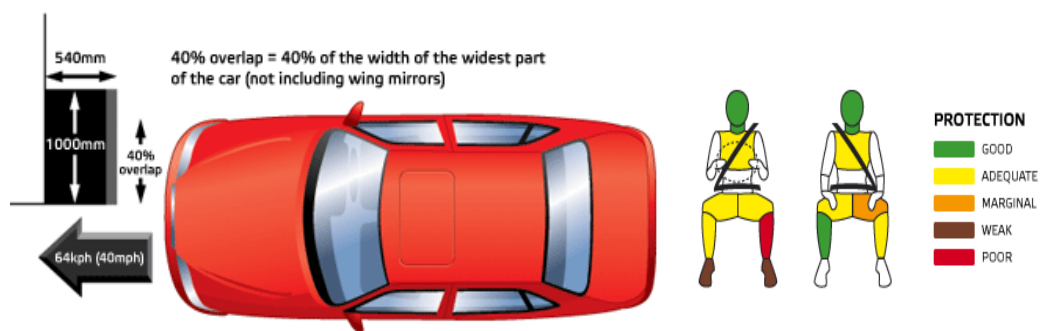


Figura 28 - Impacto frontal Euro NCAP e resultados esperados nos ocupantes [20].

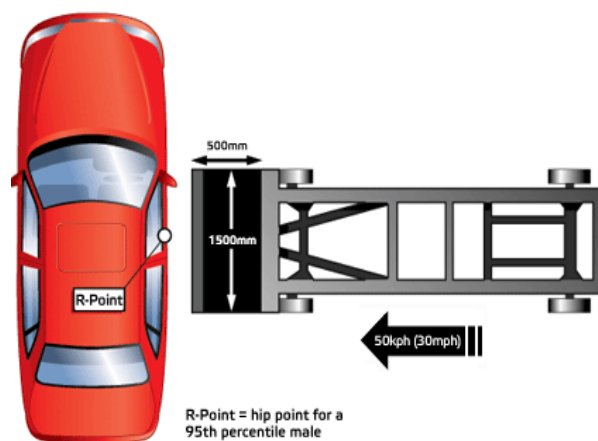


Figura 29 - Impacto lateral com outro veículo Euro NCAP [22]

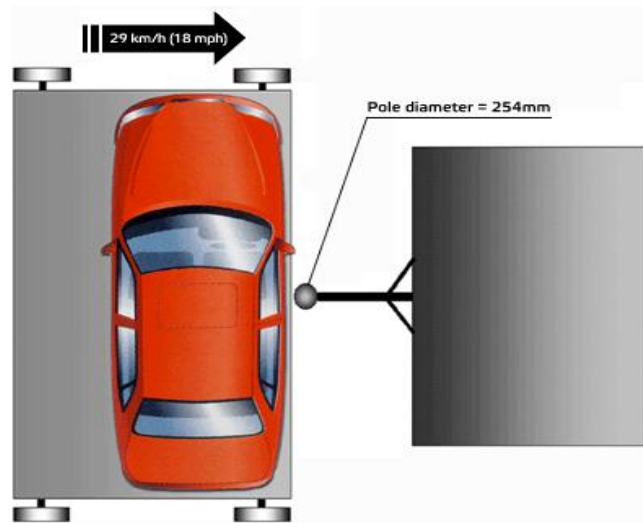


Figura 30 - Impacto lateral com poste Euro NCAP [23].



Figura 31 - Teste Impacto Traseiro Euro NCAP [24].



Figura 32 - Atropelamento de pedestres e respectivas leituras esperadas [25].

Em todos testes são utilizados Dummies (figura 33), que simulam os ocupantes dos veículos, quer sejam adultos ou crianças, com base em medidas padrão. Segundo informações fornecidas pela agência, a construção de apenas um destes modelos pode ascender aos 100.000 euros [26], o que comprova a utilização de tecnologia avançada, desde a utilização de acelerómetros e células de carga, para além das elevadas semelhanças que têm com o ser humano de medidas consideradas padrão.

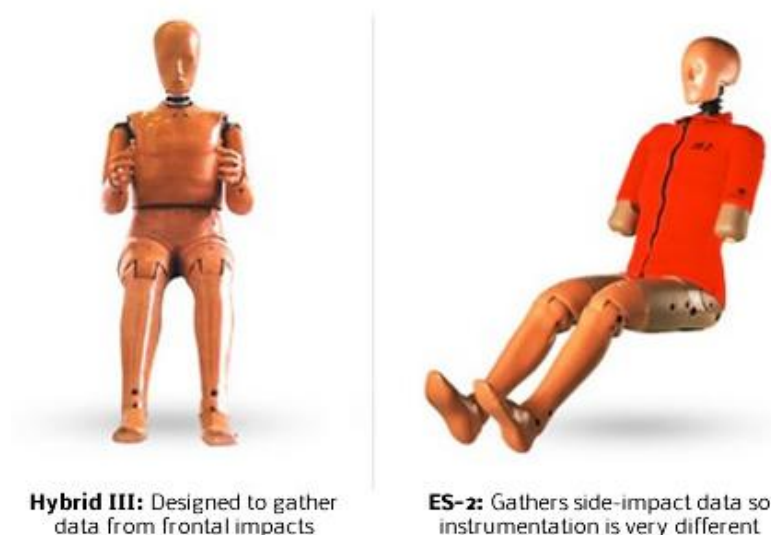


Figura 33 - Exemplos de 2 Dummies adultos da Euro NCAP [26]

2.5.2 Drop test

Um *Drop test*, consiste num ensaio (de compressão) dinâmico de componentes, normalmente estruturas tubulares, sendo considerado o principal método experimental utilizado para avaliar a absorção de energia num impacto, quer a nível laboratorial quer a nível académico. Na Universidade do Minho (UM), nomeadamente no laboratório de ensaios de materiais do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) existe um dispositivo chamado torre de queda (figura 34), concebido especificamente para efectuar ensaios deste tipo.



Figura 34 - Torre de queda do DEM, Universidade do Minho

Este tipo de ensaio consiste em abandonar uma massa variável de 76 kg a 200 kg, que se encontra a uma altura específica (até 9,5 m), sobre o componente a estudar, embatendo com o mesmo a uma determinada velocidade de impacto. Pode-se recorrer à utilização de uma câmara de alta velocidade (figura 35) para que se obtenham os dados do ensaio sob a forma de vídeo ou como uma sequência de imagens, que serão tratadas com o respectivo *software* de *tracking*, como o TEMA MOTION®.



Figura 35 - Câmara de alta Velocidade Photron última APX-RS do DEM, Universidade do Minho.

Actualmente o TEMA Motion® é o *software* líder a nível mundial no que respeita softwares de análise de movimentos. Este utiliza as imagens obtidas da câmara de alta velocidade para fazer uma análise do movimento e posteriormente fornece os resultados sobre a forma de tabelas, podendo ser exportadas para o Excel®. O operador pode escolher entre um vasto número de algoritmos ou de pontos para o *software* fazer a análise. Este permite o carregamento da maior parte dos formatos de imagem disponíveis e contem opções para controlo da maior parte das câmaras.

O *software* TEMA Motion® permite uma forma fácil de começar uma análise, o operador carrega as várias imagens obtidas pela câmara de alta velocidade e define quais os pontos a serem seguidos na sequência de imagens.

Este seguimento (tracking) opera em duas dimensões e produz coordenadas de pixéis 2D para cada ponto de cada imagem, e a partir das diferentes coordenadas de cada ponto em cada imagem são calculados o deslocamento, velocidade e aceleração do ponto identificado

Com a aceleração, facilmente se consegue calcular a carga exercida sobre o componente (F) através da fórmula:

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} . \mathbf{a} , \quad (7)$$

Onde m é a massa abandonada na torre de queda e a é a aceleração. Sabendo a carga e o deslocamento, constrói-se a curva Carga vs Deslocamento característica do ensaio. A figura 36 mostra uma curva típica de Carga vs Deslocamento para um ensaio de compressão de uma estrutura tubular [8].

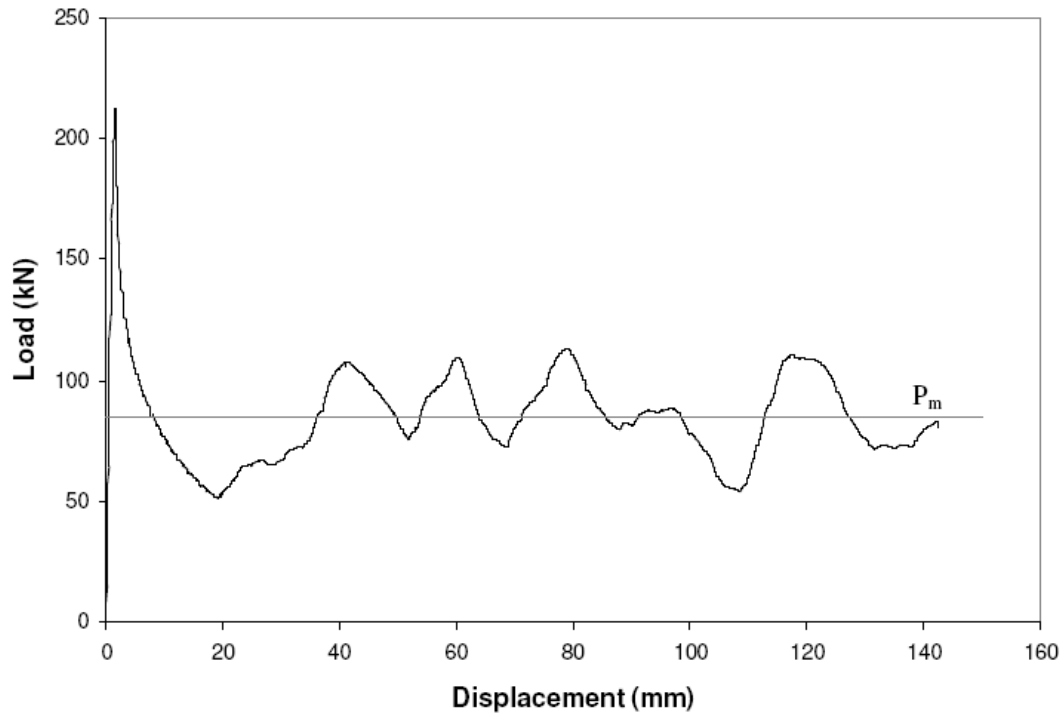


Figura 36 - Curva típica carga-deslocamento para um ensaio de compressão axial de uma estrutura tubular, com indicação da carga média P_m [8].

O registo de curvas força-deslocamento pode ser integrado para determinar energia absorvida, sendo que a carga média P_m pode ser calculada por:

$$P_m = \frac{E_a}{\delta_f} \quad , \quad (8)$$

onde δ_f é o deslocamento final e E_a a energia absorvida.

A carga média é uma indicação da capacidade de absorção de energia de uma estrutura, quando comparada com o deslocamento axial necessário para absorver a energia.

A força máxima de compressão pode ser determinada em ensaios estáticos, mas para ensaios dinâmicos de impacto o seu valor é discutível, considerando os efeitos de inércia e variações existentes no sinal proveniente de células de carga [8].

Tendo em conta a estrutura estudada neste trabalho, a sua localização e o seu propósito, serão considerados alguns parâmetros provenientes dos dois ensaios experimentais já descritos.

Do impacto frontal da agência Euro NCAP, utiliza-se como referência a velocidade do veículo aquando a colisão, nomeadamente 64km/h. Considera-se o impacto frontal uma vez que a estrutura tubular circular estudada constitui uma aproximação a uma longarina frontal de um automóvel, tornando-se deste modo um ensaio experimental passível de estudar o comportamento ao impacto deste tipo de componente quando inserido na estrutura real do automóvel.

Do ensaio *Drop Test*, pelo facto de ser o mais utilizado a nível académico para o estudo de componentes sujeitos a impacto dinâmico e por este estar disponível no DEM da Universidade do Minho, utiliza-se como referencia a massa e a velocidade de impacto. Assim sendo, os parâmetros considerados no decorrer deste trabalho dizem respeito à velocidade e à massa do impacto que corresponderão à velocidade e à massa da parede rígida definida na simulação numérica, podendo ser descritos na tabela seguinte.

Tabela 2- Parâmetros a considerar na simulação numérica.

Parâmetros Considerados	Ensaio Experimentais	
	Euro NCAP Impacto Frontal	Drop Test DEM-UM
Velocidade Impacto [km/h]	64	36
Velocidade Impacto [mm/s]	17777	10014
Massa Impacto [kg]	76	

2.5.3- Comparação de Estruturas para Absorção de Energia

Em alguns modelos de previsão teórica ou na comparação de resultados experimentais, pode utilizar-se para além da própria carga média e da energia absorvida, parâmetros adimensionais baseados na carga média. Um desses parâmetros é conhecido por eficiência, η , sendo definido por [9]:

$$\eta = \frac{P_m}{A\sigma_1} , \quad (9)$$

onde P_m é a carga média, A é a área da secção tubular e σ_1 uma tensão característica do material, que pode ser a tensão de cedência.

Neste trabalho, as estruturas (pressurizada e não pressurizada) serão comparadas através da análise da sua carga média, energia absorvida e eficiência.

2.6 Ensaios Numéricos

Com o avanço tecnológico verificado nos últimos anos ao nível da mecânica computacional, bem como o desenvolvimento das técnicas numéricas para testes de impacto, hoje em dia é possível realizar este tipo de estudo em curtos intervalos de tempo. Isto significa que os novos produtos podem ser desenvolvidos em menor tempo, já que o seu estudo numérico, que precede o seu fabrico, é realizado de forma mais rápida. Um bom exemplo do impacto da utilização de novos meios informáticos de análise numérica dá-se na indústria automóvel, onde o tempo entre a concepção de um veículo e a sua produção foi reduzido aproximadamente de três anos para um ano e meio [27].

Temos como exemplos de técnicas desenvolvidas, o Método dos Elementos Finitos (MEF) e a Dinâmica Multi-Corpo (MBD – Multi Body Dynamics). Este trabalho consiste numa análise de uma simulação numérica de um componente sujeito a impacto axial, utilizando um *software* que tem como base o princípio do método dos elementos finitos.

Actualmente existem disponíveis no mercado diversos programas de cálculo baseados no método dos elementos finitos, sendo exemplo disso programas como o LS-DYNA™ [28], PAM-CRASH™ [29] e RADIOSS™ [30]. Estes programas permitem a simulação de diferentes testes de impacto, contribuindo para uma melhoria no projecto de estruturas de veículos no âmbito do *crashworthiness*, onde se realça a preocupação na segurança dos seus ocupantes. Desta forma o MEF provou ser um aliado relevante nos testes de *crashworthiness* e os programas baseados neste, são extensivamente utilizados na indústria automóvel [31].

Neste trabalho as simulações numéricas foram realizadas em LS-DYNA™, sendo adquirida, propositadamente, uma licença com verbas provenientes de projectos de investigação.

2.6.1 LS DYNA™

O LS-DYNA™ é um programa multifuncional de elementos finitos desenvolvido pela Livermore Software Technology Corporation (LSTC) e distribuído principalmente pela companhia de engenharia com competência no método de elementos finitos CAD-FEM

GmbH. É utilizado de forma explícita e implícita para análise de estruturas não-lineares [28]. As suas análises são inteiramente automatizadas, dispondo de uma alta gama de modelos de materiais o que possibilita ao utilizador resolver problemas complexos existentes na vida real. Este *software* é utilizado em várias empresas e universidades para resolução de diferentes problemas de engenharia, como exemplo nas áreas de, *crashworthiness*, protecção do ocupante em veículos, deformação metálica, *Drop test*, impacto a altas velocidades, biomédica e análise sísmica entre outras [28].

A figura seguinte mostra algumas das aplicações possíveis no âmbito da simulação numérica do *software* LS-DYNA™

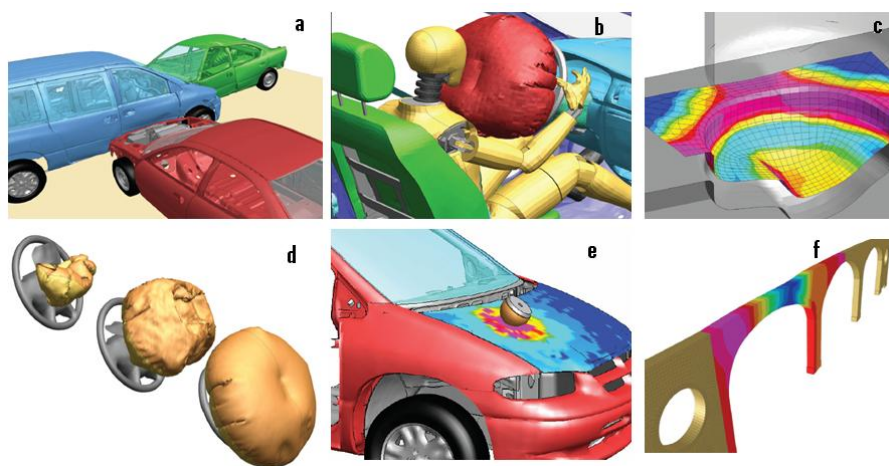


Figura 37 - Exemplos de aplicações em LS-DYNA™: a) Crashworthiness; b) Protecção de ocupantes; c) Drop Test; d) Tecnologia airbag; e) Atropelamento de peões; f) Análise sísmica [28].

No desenvolvimento deste trabalho, foram realizadas simulações numéricas em LS-DYNA™ utilizando codificação explícita. Esta refere-se ao método numérico utilizado para representar e resolver as derivadas do momento e as equações de energia tendo em conta o factor tempo. A figura 38 procura ilustrar uma descrição gráfica da integração explícita em relação ao tempo.

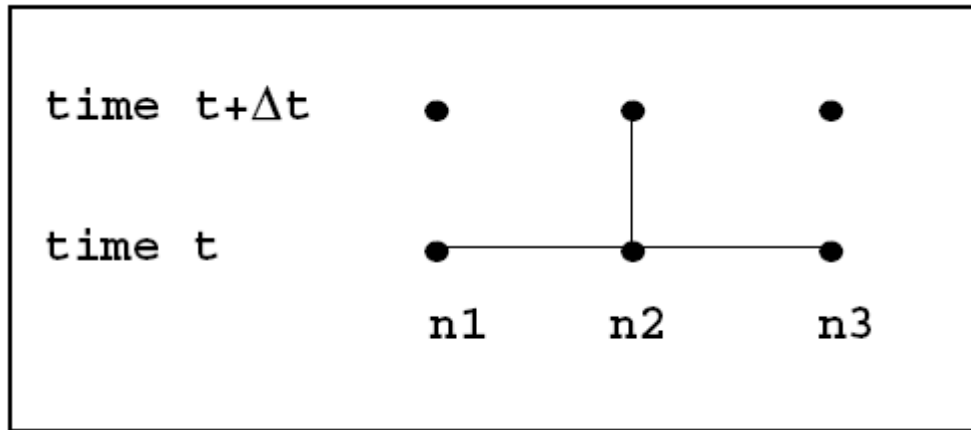


Figura 38 - Representação gráfica de integração explícita [30]

Como podemos observar, o deslocamento do nó $n2$ ao nível de tempo $t + \Delta t$ é igual aos valores conhecidos do deslocamento nos nós $n1$, $n2$ e $n3$ no nível de tempo t . Seguidamente existe a escrita de um sistema de equações explícitas para todos os nós da malha no tempo $t + \Delta t$. Cada equação é resolvida em torno dos deslocamentos desconhecidos de um nó e o intervalo de tempo Δt deve ser inferior a um valor crítico, que pode ser calculado pela seguinte expressão [32]:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c} = \frac{\Delta x}{\sqrt{\frac{E}{p}}}, \quad (10)$$

Onde E é o módulo de elasticidade, p é a densidade e Δx a distância entre os nós. O intervalo de tempo Δt sendo menor que o valor crítico calculado pela equação (10), vai evitar que a acumulação de erros de cálculo aumente o que se traduziria numa solução resultante pouco viável. Assim sendo, o intervalo de tempo deve ser menor que o intervalo de tempo que leva um sinal, que se desloca à velocidade do som, a percorrer a distância entre os nós (Δx) através do material $\left(\sqrt{\frac{E}{p}}\right)$ [32].

O LS-DYNA™ utiliza a estruturação dos dados fornecidos pelo utilizador para a realização dos ensaios numéricos, através de *keywords*. Estas permitem a introdução de

parâmetros relativos ao estudo a realizar, como por exemplo: estrutura, material, tipo de simulação e parâmetros de controlo, entre outros.

As *keywords* permitem obter dados flexíveis e lógicos estando organizados de uma forma simples de entender uma vez que as funções semelhantes são agrupadas dentro da mesma keyword. Existem várias secções possíveis na estruturação de uma keyword completa, tais como por exemplo a definição das curvas do material e da pressão (figura 39) e as propriedades do material (figura 40). Quase todos os dados do modelo são constituídos por blocos. Em anexo encontra-se um exemplo de estruturação de uma keyword completa (Anexo B).

```
*DEFINE_CURVE_TITLE
Aço H400
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo
dattyp
      1          0  1.000000  1.000000      0.000      0.000
0
$#          a1          o1
      0.000          453.0000000
      0.0055380          507.2699890
      0.0246900          615.0000000
      0.0800430          758.3300171
      0.1300500          854.1599731
      0.2515400          1030.5000000
      0.2835100          1013.0000000

*DEFINE_CURVE_TITLE
Pressão 1.5MPa
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo
dattyp
      2          0  1.000000  1.000000      0.000      0.000
0
$#          a1          o1
      0.000          -1.5000000
      0.0100000          -1.5000000
      0.0200000          -1.5000000
      0.0300000          -1.5000000
```

Figura 39 - Exemplo de estruturação das Keywords no LS-DYNA™, secção de definição de curvas características.

```
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_TITLE
Aço H400
$#      mid      ro      e      pr      sigy      etan
fail      tdel
      1 7.3800E-9 2.1000E+5 0.300000 453.000000 0.0001.0000E+
21      0.000
$#      c      p      lcss      lcsr      vp
1150.0000 7.750000      1      0      0.000
$#      eps1      eps2      eps3      eps4      eps5      eps6
eps7      eps8
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
0.000      0.000
$#      es1      es2      es3      es4      es5      es6
eps7      es8
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
0.000      0.000
```

Figura 40 - Exemplo de estruturação das Keywords no LS-DYNA™, secção de definição das propriedades do material.

2.7 Aço inoxidável H400

O aço com designação H400 refere-se a uma liga de aço inoxidável austenítico. De uma forma geral, os aços inoxidáveis austeníticos apresentam uma boa resistência à corrosão, apresentando 16 a 25% de cromo e 7 a 20% de níquel. Dentro da gama de aços inoxidáveis (martensíticos, ferríticos e austeníticos), os austeníticos são os que apresentam maior resistência à corrosão, a combinação do baixo limite de escoamento com a alta resistência a tracção e bom alongamento, oferece as melhores propriedades para trabalho a frio. Não sofrem endurecimento secundário mediante tratamento térmico mas a sua resistência a tracção e dureza podem ser aumentadas por encruamento. Estes aços possuem desta forma uma ampla faixa de propriedades mecânicas apresentando uma boa ductilidade e resistência a altas/ baixas temperaturas, além de serem fáceis de trabalhar e possuírem uma boa soldabilidade [33] [34].

Mais em particular, o Nirosta® H400 é considerado um aço de alta resistência que apresenta excelentes resultados quando sujeito a situações de impacto [35]. Tal facto deve-se às suas excelentes propriedades mecânicas, nomeadamente a sua elevada capacidade de absorção de energia conjugada com um excelente alongamento à rotura de cerca de 45%, como se pode ver na figura 41.

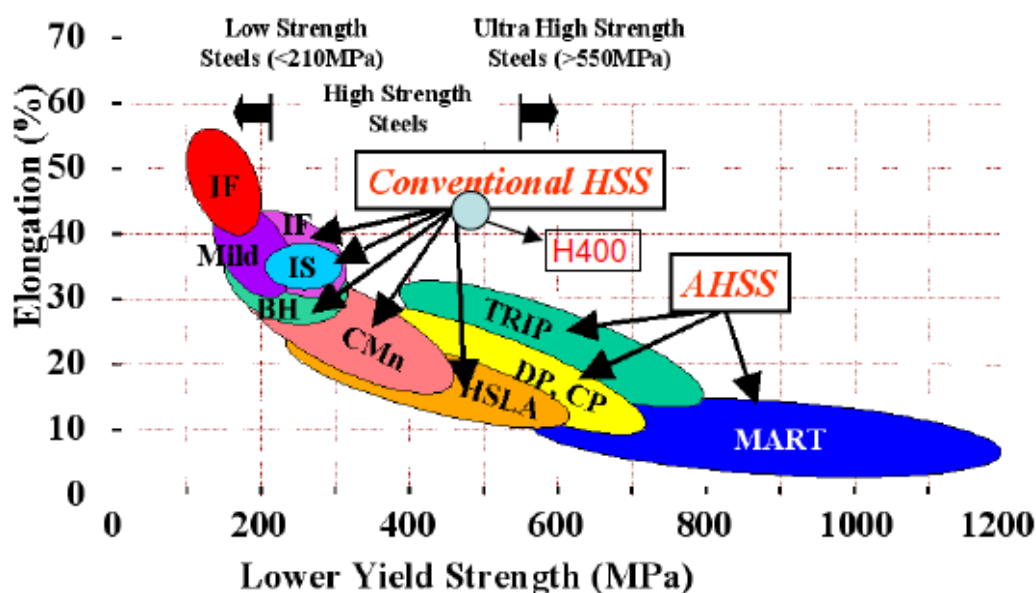


Figura 41 - Taxa de alongamento para aço inoxidável H400. [35]

Devido à sua estrutura austenítica instável, o Nitosta® H400 é facilmente endurecido quando trabalhado a frio, o que se torna numa característica muito útil para a absorção de energia em situação de impacto – boa aptidão para Crashworthiness. Apresenta, ainda uma boa resistência à corrosão. A principal desvantagem deste tipo de aço recai sobretudo no seu elevado preço, sendo por isso, utilizado apenas em estruturas de veículos de marcas de alta gama [33].

Na tabela 3, apresentam-se algumas das propriedades deste tipo de aço que foram utilizadas no decorrer deste trabalho.

Tabela 3 - Propriedades do Aço H400 [36].

	E [MPa]	ρ [Ton/mm ³]	σ_y [MPa]	σ_r [MPa]	Constantes	
					D [s ⁻¹]	p
Aço H400	210e+5	7.38e-9	453	799	1150	7.75

Onde **E** é o módulo de Young, o ρ é a densidade do material, o parâmetro σ_y é a tensão de cedência e σ_r é a tensão de rotura. Os valores das constantes *D* e *p*, são retirados da tabela 1 do Capítulo 2.1.

Este aço constitui uma boa escolha para o desenvolvimento deste trabalho, essencialmente por dois motivos:

- Apresenta um excelente alongamento à rotura, o que irá beneficiar a pressurização interna, isto é, permite um elevado alongamento durante o impacto - ideal para manter a pressão interna (não há fugas).
- Já foi estudado anteriormente no laboratório de ensaio de materiais, no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho. Foi realizado um ensaio de tracção, em que se obteve a sua curva Tensão real Vs Deformação real (figura 42).

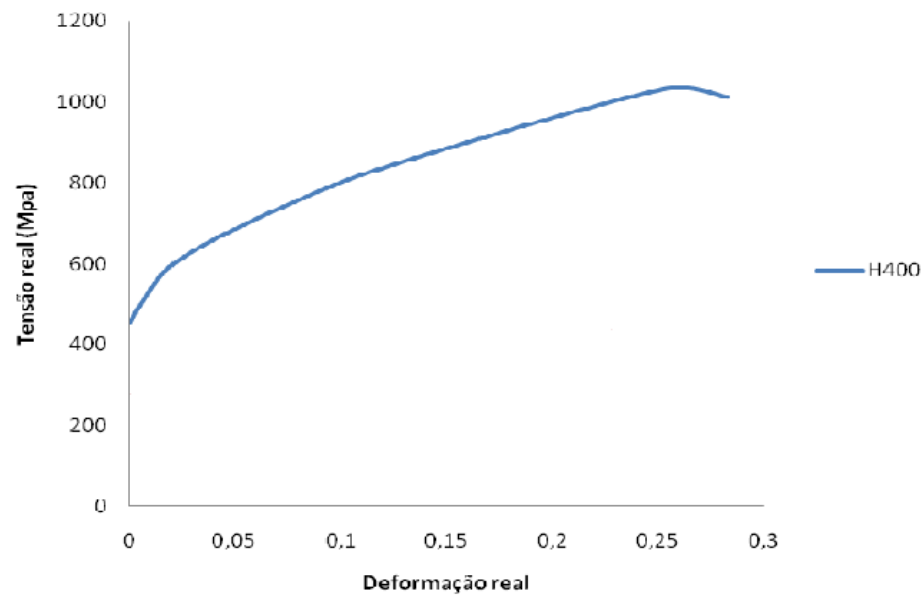


Figura 42 - Curva Tensão real Vs Deformação real para aço inoxidável H400 [33].

3. Construção do Modelo Numérico

3.1. Geometria Pretendida

Na figura 43, estão representadas as dimensões nominais, em milímetros, da estrutura pretendida para a realização da simulação numérica.

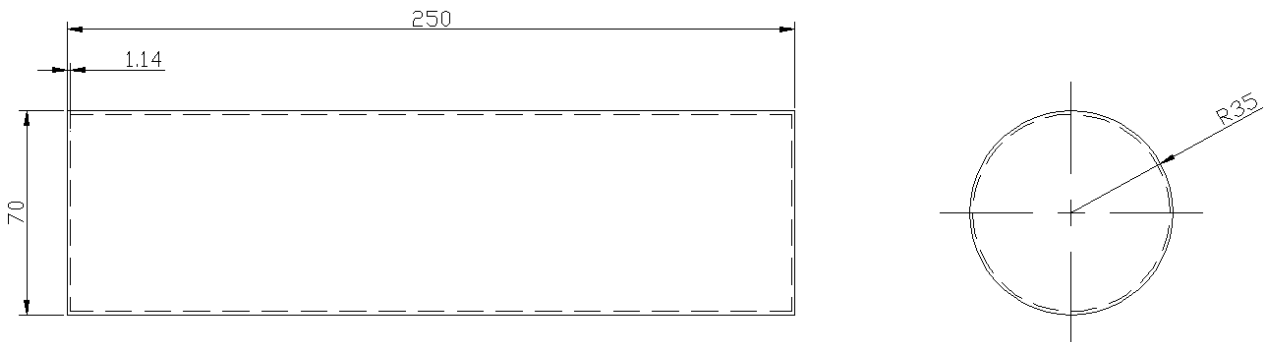


Figura 43 - Dimensões nominais da estrutura tubular circular de espessura 1.14mm.

Foi escolhida uma espessura de parede de 1.14mm, uma vez que esta já tinha sido anteriormente estudada no ensaio de tracção do aço inoxidável H400, no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) [33], assim como numa tese de dissertação em ano anterior [36]. Assim sendo, escolheu-se essencialmente por uma questão de coerência nos resultados. Esta estrutura será submetida a simulações numéricas de impacto axial, onde se estudará o efeito da pressurização interna para estas condições, tendo sempre como principal objectivo verificar a possibilidade de se efectuar uma redução da espessura da mesma e, consequentemente, do seu peso, procurando manter a mesma resposta ao choque. Isto é, não se pretende melhorar a resistência ao choque da estrutura com a introdução de pressão no seu interior, mas sim obter os mesmos resultados ou muito próximos destes, considerando as mesmas condições de impacto, utilizando essa mesma pressão mas no interior de uma estrutura de espessura inferior. Com base nos resultados, obter-se-á um novo valor limite para a espessura de uma estrutura pressurizada a 20 bar que permita obter a mesma resposta aquando do impacto.

3.2. Keywords Utilizadas

Na tabela seguinte encontram-se as *keywords* utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

Tabela 4 - Keywords utilizadas no LS-DYNA™.

Keywords
<i>Mesh</i>
<i>Node</i>
<i>SPC_Node</i>
<i>Wall</i>
<i>Rgdwal</i>
<i>Define</i>
<i>Mat</i>
<i>Section</i>
<i>Part</i>
<i>Control</i>
<i>Database</i>

Keyword *MESH

Esta keyword permite a criação de malhas de diversas entidades presentes na biblioteca interna do *software*, desde sólidos ou cascas. Para este trabalho foi definida a entidade *Cylinder_Shell* (figura 44) com um raio de 35mm e comprimento 250mm. Foi necessário definir o número de elementos presentes na zona circunferencial e longitudinal da peça, foram considerados 40 e 50, respectivamente. A definição do número de nós nas direções indicadas foi limitada uma vez que a licença utilizada para esta versão do programa apenas possibilitava a utilização de um máximo de 10000 elementos. A opção *top and bottom* foi selecionada e permitiu definir a casca como uma superfície fechada, já que se considera um topo e um fundo na estrutura. Selecionou-se a construção segundo o eixo Z com a opção *dirz*.

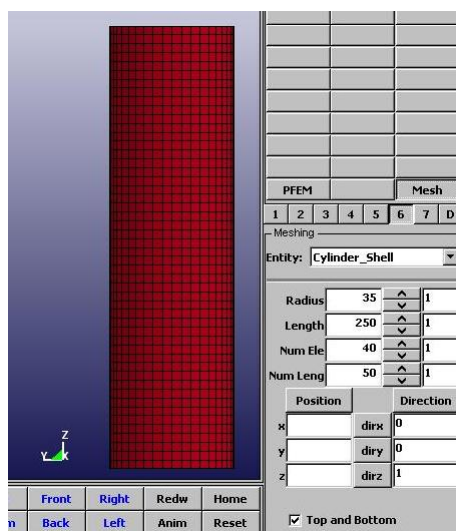


Figura 44 - Criação da casca cilíndrica.

Keyword *Node

Esta keyword permite-nos ter acesso à lista de todos os nós presentes na casca cilíndrica, o que irá facilitar a criação dos iniciadores de deformação. Foram seleccionados, um a um, os nós 2803, 2804, 2822, 2823, 2824 e 2842, aos quais foi implementado um deslocamento de 1mm segundo o eixo Y (passando de 35mm a 34mm). Estes nós foram seleccionados com base no facto de ser no plano formado pelos mesmos que se inicia a deformação da estrutura, caso a simulação corresse sem que se considerassem os triggers. Para tal foi necessário realizar um ensaio prévio sem a utilização dos mesmos. Esta técnica foi adoptada propositadamente para este trabalho, já que era forma mais viável para se descobrir o local do início da deformação caso a estrutura não possuísse estas “imperfeições”, ou seja, o início de deformação natural da estrutura quando submetida ao impacto axial. Seguidamente, introduziram-se propositadamente essas “imperfeições”, estando assegurado que a deformação se iniciará aí. A figura 45 ilustra os iniciadores de deformação introduzidos na estrutura por este método.

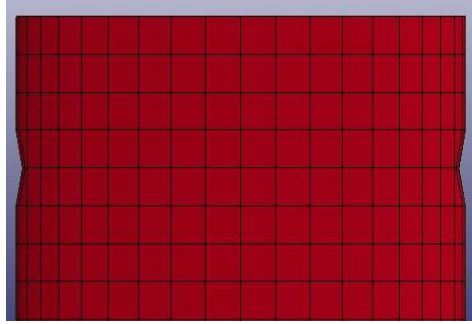


Figura 45 - Iniciadores de Deformação introduzidos na casca cilíndrica.

Keyword*SPC_NODE

Esta keyword possibilita especificar condições de limite/fronteira, neste caso para os nós (*node*- do Inglês). Com ela podemos definir um limite de movimentos impostos a determinados nós. Neste trabalho as restrições recaíram sobre fixar a base da estrutura, de modo a esta não ser dotada de movimentos em qualquer sentido, tal como se pode ver na figura 46. Foram restringidos desta forma, os deslocamentos dos nós que constituem a base nos eixos **x,y,z** e as respectivas rotações **R_x,R_y,R_z**. Um dos métodos mais rápidos de seleccionar todos os nós a serem restringidos, passou por seleccionar apenas um da base e aceitar a opção **plan**, de forma a definir o plano que o contém (toda a base).

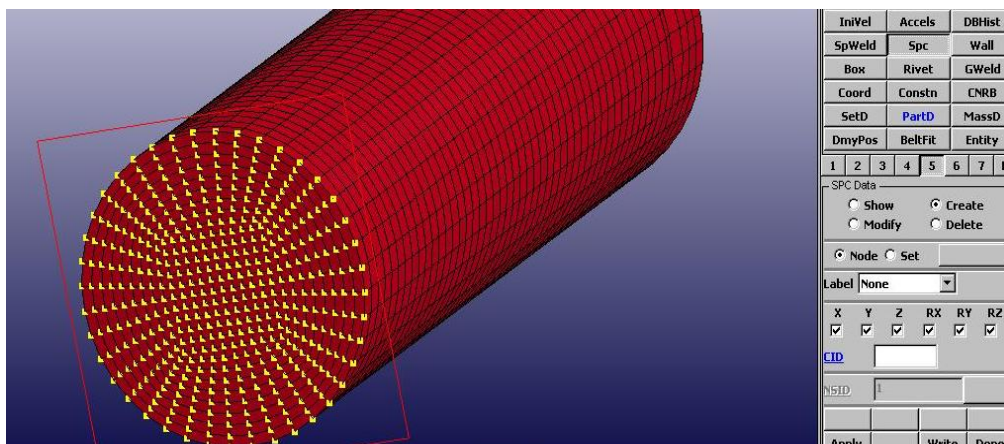


Figura 46 - Restrições aplicadas aos nós que constituem a base da estrutura.

Keyword *WALL

Esta keyword permite criar a parede rígida que irá colidir com o componente, simulando o impacto axial. É definida em duas secções, a _GEOMETRIC e _PLANAR, onde as “paredes rígidas” (Rigidwall – do Inglês) podem ser estacionárias ou ter um movimento de translação com massa e velocidade inicial. As paredes geométricas podem assumir formas com geometria definida como por exemplo cilindros ou prismas rectangulares. Este tipo de parede é do tipo estacionário podendo no entanto ser activado o movimento com a opção MOTION (movimento - do Português). Para este trabalho, foram escolhidas as opções *planar* e *moving*, definindo desta forma uma parede rígida planar com determinada massa e dotada de movimento, como se pode ver na figura 47. A massa (em toneladas) foi indicada como 0.076ton. Quanto à velocidade esta é definida pelo vector **N**, sendo necessário escolher uma origem e um fim do mesmo, sendo considerada a origem no topo e o fim a meio da peça (*tail* = 250 e *head* = 125). Os valores escolhidos para velocidade foram 10014 mm/s e 17777 mm/s, que representam os 36 km/h e os 64km/h, praticados no *Drop test* e no ensaio de impacto frontal Euro NCAP, respectivamente.

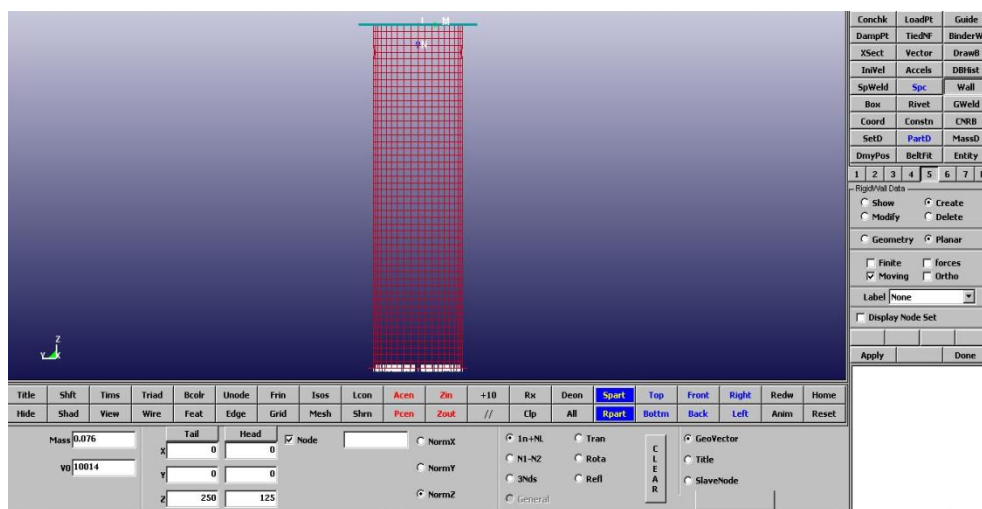


Figura 47 - Aplicação da parede rígida móvel.

KeywordRgdwal***

Esta keyword é utilizada por forma a definir uma identificação à parede criada (*new ID* = *I*). Foram ainda verificadas novamente as propriedades da mesma (figura 48) e definido o coeficiente de fricção da mesma como 1.0 (*FRIC* = 1.0), garantindo que após o impacto a parede fica junto à estrutura (não ressalta).

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done 1

☐ Use *PARAMETER (Subsys: 1) Setting

*RIGIDWALL_PLANAR_MOVING (1)

1	ID	TITLE						
		1 Parede Móvel						
2	NSID	NSIDEX	BOXID	OFFSET	BIRTH	DEATH	RWKSF	
	0	0	0	0.0	0.0	1.000e+020	1.0000000	
3	XT	YT	ZT	XH	YH	ZH	FRIC	WVFL
	0.0	0.0	250.00000	0.0	0.0	125.00000	1.0000000	0.0
4	MASS	VO						
	0.0760000	1.001e+004						
COMMENT:								

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Figura 48 - Atribuição de identificação e propriedades da parede rígida móvel.

KeywordDEFINE***

Esta keyword permite-nos definir **curvas** tensão vs deformação de um material, comportamentos constitutivos, vectores, sistemas de coordenadas locais e vectores de orientação específica para elementos de amortecimento. As definições atribuídas a cada item nesta secção são referenciadas pelos seus identificadores ao longo de cada entrada de dados. Foi utilizada a opção **CURVE** (figura 49) para definir a curva tensão vs deformação do aço inoxidável H400 que constitui a estrutura, bem como a curva de pressão interna envolvida na simulação. Se o componente fosse constituído por mais que um material era aqui que se definia também a curva tensão vs deformação dos restantes. Os valores introduzidos provêm da curva Tensão real Vs Deformação real do aço inoxidável H400 [33].

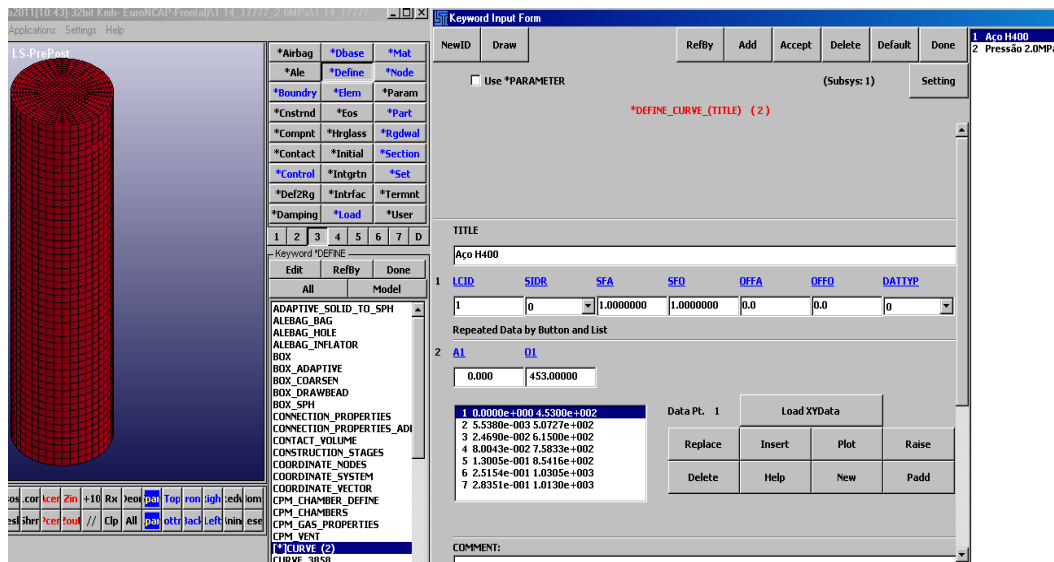


Figura 49 - Definição da Curva do material e de pressão interna.

Keyword**MAT*

Com esta keyword, define-se o tipo de material a ser implementado no modelo numérico, tratando-se de um dos pontos mais importantes já que devido aos diferentes comportamentos dos materiais estes devem ser escolhidos com cuidado. Foi selecionado da lista que o programa nos apresentava o material **024-Piecewise Linear Plasticity**, uma vez que é um material elásto-plástico podendo-se definir uma curva tensão vs deformação e ainda definir o momento de ruptura baseado na deformação ou num determinado intervalo de tempo. Aqui também são introduzidas algumas propriedades do material (figura 50) tais como a densidade, o módulo de elasticidade, a tensão cedência e os parâmetros c e p da equação de Cowper- Symmonds. É ainda definido o coeficiente de poisson a considerar nos cálculos numéricos.

É importante referir que é necessário fazer a correspondência do material com a curva característica do mesmo, definida anteriormente. Para tal, clica-se em **LCSS** e faz-se a respectiva correspondência.

Keyword Input Form

RelBy Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *PARAMETER (Subsys: 1) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (1)

TITLE

Propriedades do Material

1	MID	R0	E	PR	STGY	ETAN	FAIL	TDEL
1		7.38e9	2.10e5	0.30	453.0	0.0	10.E+20	0.0
2	C	P	LCSS	LCSR	VP			
	1150	7.75	1	0	0.0			
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura 50 - Propriedades do Material Piecewise_Linear_Plasticity.

Keyword*SECTION

Esta keyword permite selecionar o tipo de elemento que compõe a casca cilíndrica, as regras de integração e espessura da casca. Seleciona-se da lista de secções disponíveis a opção *Shell*, que significa casca. Definem-se algumas propriedades da casca, nomeadamente a espessura ($T1, T2, T3$ e $T4$), o tipo de elemento a utilizar (**ELFORM**) e o número de integrações (**NIP**). A figura 51 ilustra a utilização desta keyword bem como as propriedades consideradas para a casca de espessura 1.14mm. Para o caso de diferentes espessuras de casca utiliza-se o mesmo processo.

Keyword Input Form

RelBy Sort/T1 Add Accept Delete Default Done

☐ Use *PARAMETER (Subsys: 1) Setting

*SECTION_SHELL_(TITLE) (1)

TITLE

Espeçura Casca_1.14mm

1	SECID	ELFORM	SHRE	NIP	PROPT	OR/TRID	ICOMP	SETYP
1		2	1.0000000	5	1	0	0	1
2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
	1.1400000	1.1400000	1.1400000	1.1400000	0.0	0.0	0.0	0

Repeated Data by Button and List

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Keyword *SECTION

Edit RelBy Done

All Model

- ALE2D
- BEAM
- BEAM_AISC
- DISCRETE
- POINT_SOURCE
- POINT_SOURCE_MIXTURE
- SPRING_DAMPER
- SEATBELT
- SHELL (1)
- SHELL_ALE
- SHELL_EFG
- SHELL_THERMAL
- SOLID
- SOLID_ALE
- SOLID_EFG
- SPI
- TSHLL

Figura 51 - Definir a secção da estrutura.

Foram considerados elementos constituídos por 4 nós do tipo 2 – Belytschko - Tsay (figura 52), uma vez que este tipo de elemento possibilita uma boa capacidade de flexão e membrana para grandes deformações, quer a nível de esforços transversais quer de esforços axiais, possuindo 12 graus de liberdade em cada nó correspondentes à translação, rotação, velocidade e aceleração em cada nó, na direcção dos eixos X, Y e Z. Este tipo de elementos é bastante utilizado em análise dinâmicas explícitas, pelo que se encontra pré-seleccionado por defeito à partida.

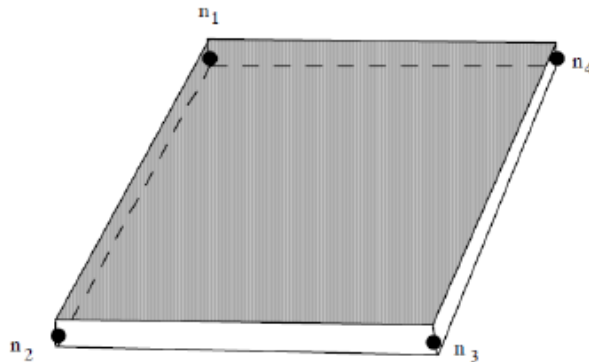


Figura 52 - Elemento de casca tipo 2 Belytschko – Tsay [36].

Keyword *PART

Utiliza-se esta keyword para fazer corresponder o tipo de secção (*SECID*) e o material (*MID*) às “parts” envolvidas (componentes), que neste caso é apenas uma. Este passo é importante já que se atribui uma correspondência entre todos os dados até aqui inseridos, associando-os à estrutura a que se destinam.

Keyword*CONTROL

Esta keyword serve para que se escolham os parâmetros a controlar na simulação numérica. De acordo com o manual do LS-Dyna™ [37], os parâmetros a controlar mais adequados para este tipo de simulação numérica (estrutura tubular de paredes finas submetida a impacto axial) foram os que se ilustram na figura 53, nomeadamente:

- i. *Bulk_Viscosity*;
- ii. *Contact*;
- iii. *Dynamic_Relaxation*;
- iv. *Energy*;
- v. *Hourglass*;
- vi. *Termination*.

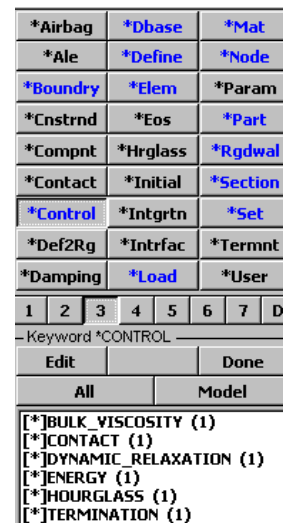


Figura 53 - Parâmetros a controlar na simulação.

O parâmetro *Bulk_Viscosity*, permite ajustar os coeficientes de viscosidade do material, sendo útil em alguns materiais para que possa existir uma propagação da onda de choque e permite que esta seja tratada automaticamente.

O parâmetro de controlo *Contact* permite corrigir eventuais erros de cálculo entre superfícies de contacto.

O *Dynamic_Relaxation* permite simular uma pré-carga iniciando tensões e deformações existentes, neste tipo de pré-cargas podem ser incluídas cargas devido à gravidade, uma velocidade angular constante ou até mesmo de aperto de um parafuso.

Os parâmetros *Energy*, *Hourglass* e *Termination* controlam as opções de dissipação de energia, anula valores em falta da hourglass e atribui um intervalo de tempo para a terminação do processo (neste estudo foi definido 0.03s), respectivamente.

Keyword*DATABASE

Utiliza-se esta keyword de modo a escolher que dados irão ser retirados da simulação numérica. Neste estudo foram escolhidos os dados a retirar da simulação:

- i. *ASCII_Option (BNDOUT, GLSTAT, RCFORC, SPCFORC);*
- ii. *Binary_D3PLOT;*
- iii. *Binary_D3THDT.*

O parâmetro **BNDOUT** é relativo a condições de limite de forças e energias, o **GLSTAT** permite extrair dados globais, o **RCFORC** diz respeito à extracção do valor das forças de interfaces resultantes e o **SPCFORC** permite extrair valores de forças de reacção. Para todos estes é necessário apenas definir o intervalo de tempo entre *inputs*, tendo sido considerado 0.0002s.

Por outro lado o **Binary_D3PLOT** permite retirar informações relativas ao intervalo de tempo em que se desenvolve todo o processo de simulação incluindo deslocamentos, velocidades e acelerações.

Quanto ao **Binary_D3THDT** refere-se ao historial de elementos de subconjuntos e o seu intervalo de tempo.

3.3. Pressão Interna no Modelo Numérico

Este passo realiza-se por último uma vez que caso seja necessário alterar algum dos parâmetros anteriores, a simulação numérica irá entrar em conflito.

Para introduzir a pressão interna na estrutura é necessário efectuar em primeiro lugar a definição da curva de pressão pretendida com a **keyword*DEFINE_CURVE**. A curva terá que ser constituída por valores negativos de pressão, desta forma estamos a considerar que a pressão actuará de dentro para fora da estrutura (pressão interna). Foram considerados valores de pressão interna constantes durante o decorrer de todo o ensaio numérico, com o aparecimento da mesma no instante inicial e mantendo-se constante até o final da simulação.

De seguida utiliza-se a **keyword*SetD** criando-se um novo **SET_SHELL** e clica-se em **Pick Ent**, seleccionando-se toda a estrutura. Desta forma estamos a implementar no subsistema do *software* a atribuição de uma superfície constituída por toda a casca da estrutura (**part**), para efeitos de aplicação de cargas posteriores – obtém-se assim uma **Shell_list** onde se aplicará a carga posteriormente. Aparecerá a informação que a **part**

será denominada no subsistema por *cylindershell*. Assim toda a estrutura será considerada uma superfície onde actuará a carga.

Para aplicar a carga propriamente dita, utiliza-se a *keyword*load* onde se selecciona a opção *SHELL_SET*, que permitirá a aplicação da mesma na *Shell_list* criada anteriormente. Faz-se então corresponder a Shell (ESID), a curva de pressão (LCID) e define-se o tempo de chegada da pressão (AT), que deverá ser coerente com o intervalo estipulado na curva de pressão. A figura 54 ilustra a segunda parte desta etapa.

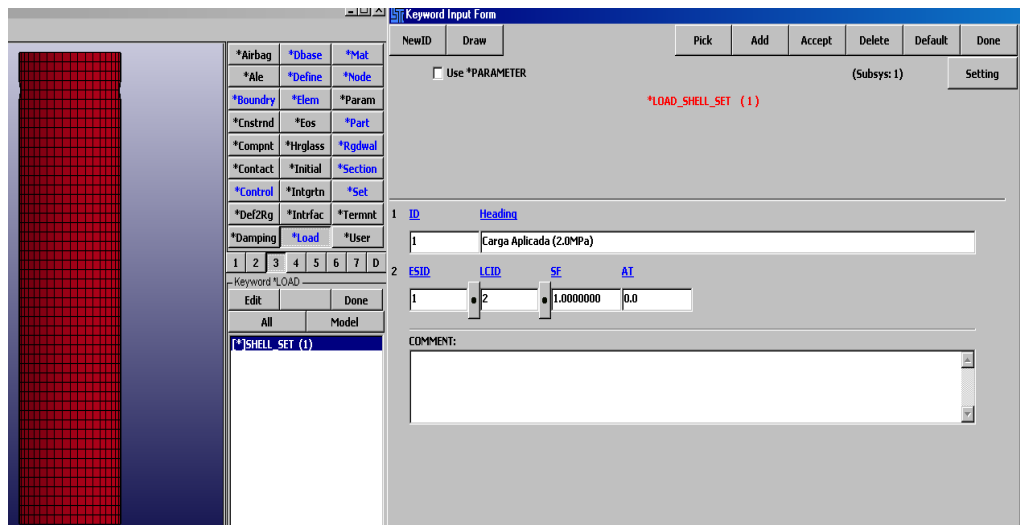


Figura 54 - Atribuição da Pressão Interna.

4. Resultados e Discussão

4.1. Ensaio sobre Estrutura Inicial

Foram realizados ensaios numéricos em estruturas tubulares de secção transversal circular, utilizando o LS-DYNA™. A nomenclatura utilizada para denominar cada ensaio é de relativamente fácil compreensão, podendo ser explicada da seguinte forma:

$$\text{Nome do Ensaio} = \text{Espessura_Velocidade_Pressão}$$

Assim sendo, na tabela seguinte estão representados todos os ensaios efectuados numa primeira fase bem como os parâmetros utilizados na simulação.

Tabela 5 - Nomenclatura utilizada nos ensaios e parâmetros dos mesmos.

Ensaio	Espessura [mm]	Velocidade Impacto [mm/s]	Pressão [MPa]	Massa Impacto [Kg]
1.14_10014_0.0	1,14	10014	0,1	76
1.14_10014_0.5	1,14	10014	0,5	76
1.14_10014_1.0	1,14	10014	1,0	76
1.14_10014_1.5	1,14	10014	1,5	76
1.14_10014_2.0	1,14	10014	2,0	76
1.14_17777_0.0	1,14	17777	0,1	76
1.14_17777_0.5	1,14	17777	0,5	76
1.14_17777_1.0	1,14	17777	1,0	76
1.14_17777_1.5	1,14	17777	1,5	76
1.14_17777_2.0	1,14	17777	2,0	76

Note-se que o valor utilizado na nomenclatura para definir a **pressão interna de 0.0 MPa não significa** que no interior da estrutura se encontra **vácuo** (pressão 0 bar), mas sim **pressão atmosférica (0,1MPa ~1 bar)**. Por uma questão de simplicidade utilizou-se 0.0 na nomenclatura, indicando apenas o valor de pressão interna introduzida propositadamente. Se não foi introduzida pressão interna, utiliza-se a nomenclatura 0.0, estando a estrutura com pressão interna atmosférica.

Um dos objectivos deste trabalho foi realizar, numa **primeira fase**, uma análise quanto ao efeito da introdução de pressão no interior da estrutura, nomeadamente o deslocamento final (δ_f), a energia absorvida (E_a), a carga média (P_m) e a eficiência da estrutura (η) quando submetida ao impacto axial. Entenda-se por deslocamento final o

mesmo que **deslocamento total sofrido**. Os resultados obtidos para esta etapa, são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Resultados Obtidos nos ensaios iniciais.

Ensaio	δ_f [mm]	E_a [kJ]	P_m [kN]	η [%]
1.14_10014_0.0	54	3,9	72,4	64,8
1.14_10014_0.5	51	3,8	74,8	66,9
1.14_10014_1.0	49	3,7	76,9	68,9
1.14_10014_1.5	47	3,7	79,0	70,8
1.14_10014_2.0	46	3,7	82,0	73,5
1.14_17777_0.0	159	12,1	76,0	68,1
1.14_17777_0.5	153	11,9	78,1	69,9
1.14_17777_1.0	149	11,9	80,2	71,8
1.14_17777_1.5	144	11,9	82,6	73,9
1.14_17777_2.0	131	11,9	90,7	81,3

Como era previsível, tanto para a velocidade de impacto mais baixa como para a mais elevada, o deslocamento final (δ_f) foi diminuindo com o aumento da pressão inserida no interior da estrutura. Também era de esperar que houvesse uma pequena quebra quanto à energia absorvida (E_a) pela mesma, o que se veio a verificar, obtendo-se valores que rondam os 3,9 kJ e 12kJ, para a velocidade mais baixa e para a mais alta, respectivamente. Esta ligeira diminuição estará relacionada com erros de cálculo que tenham sido cometidos pela simulação numérica, nomeadamente relacionados com o tamanho de malha utilizado (limitação do numero de elementos por parte da licença utilizada). No entanto, são valores muito próximos, pelo que se conclui que a energia absorvida nos ensaios foi praticamente a mesma (para a mesma velocidade de impacto), como seria de esperar. Para corrigir este pequeno problema teria que se optar por uma licença que possibilitasse a utilização de um número maior de elementos (malha mais refinada traduz-se em resultados mais precisos). No que respeita à carga média (P_m), assistiu-se a um aumento, consequência do aumento da pressão interna, sendo que este tipo de resultado já seria de esperar, tal como se ilustrou na figura 27 do Capítulo 2, onde se indicava um aumento de 20% da carga média quando se introduzia uma pressão interna de 15bar. Para este caso, verifica-se um aumento de 13,26% e de 19,34% (aplicando uma pressão interna de 20bar), para a velocidade de 10014mm/s e 17777mm/s, respectivamente (figura 55).

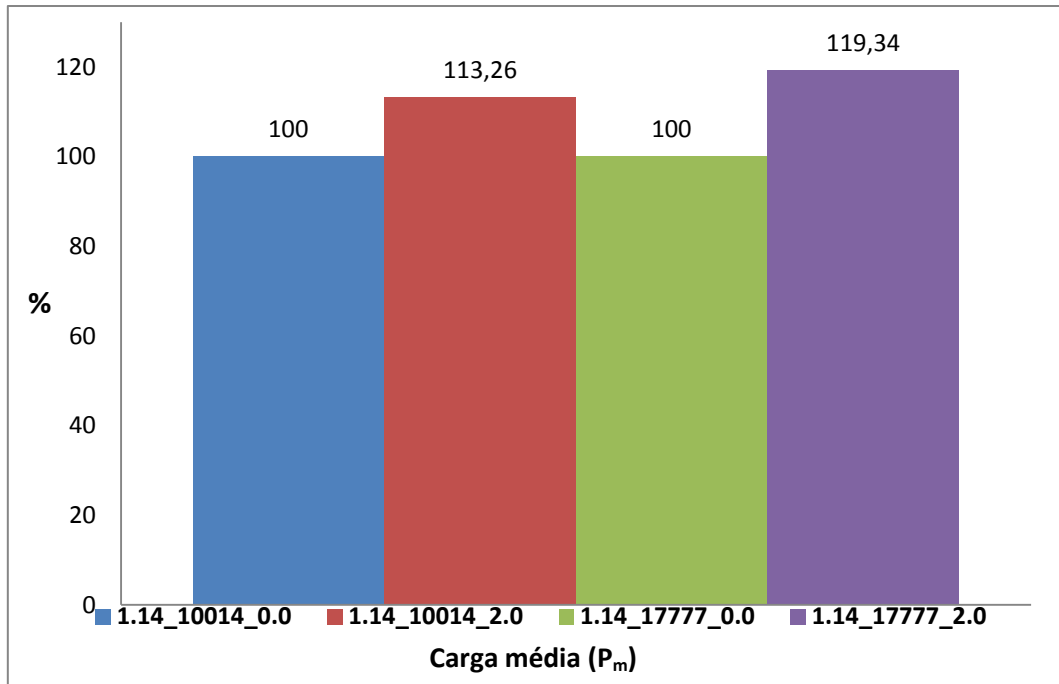


Figura 55 - Gráfico ilustrativo do aumento da carga média.

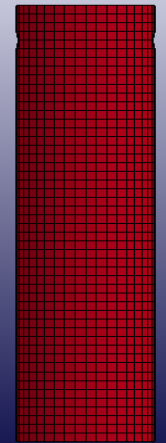
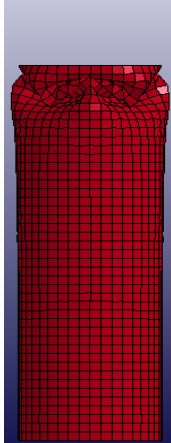
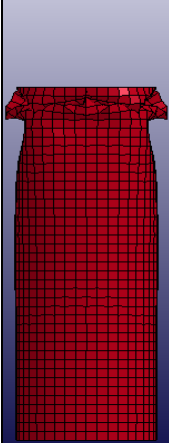
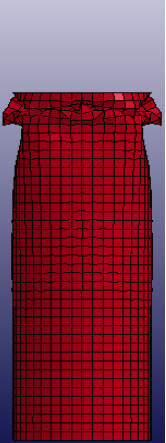

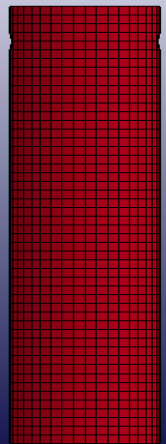
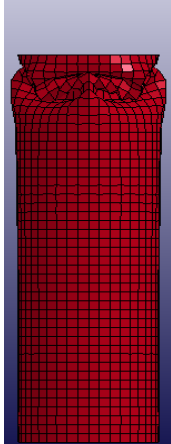
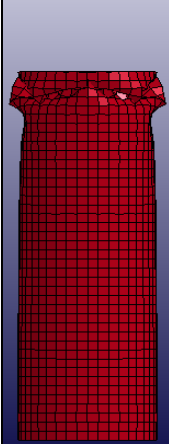
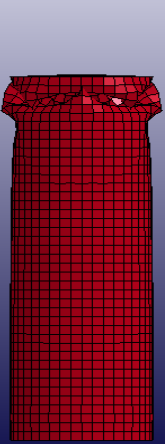
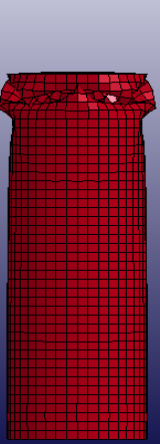
Sabendo que a eficiência da estrutura para absorção de energia (η) depende da carga média, da área da seção tubular e da tensão de cedência do material (ver fórmula 5 capítulo 2), sendo que estas duas últimas são iguais para estes ensaios (mesma estrutura e mesmo material), facilmente se previa um aumento da eficiência da estrutura. Verifica-se que a eficiência da estrutura para absorção de energia varia desde cerca de 65% (sem pressão inserida) até cerca de 74% (20 bar), para a velocidade de impacto mais baixa. Para a velocidade superior, variava de cerca de 68 % (sem pressão inserida) e 81% (com 20 bar internos).

Graficamente, pode ser realizada uma comparação sobre o efeito da introdução dos 20bar na estrutura para ambas as velocidades de impacto, nomeadamente através da comparação das suas curvas deslocamento Vs tempo e carga Vs deslocamento.

Para velocidade de impacto de 10014 mm/s,

A tabela 7 apresenta a comparação do modo de colapso ao longo do tempo para os dois ensaios (sem pressão vs com pressão), realizados com esta velocidade de impacto.

Tabela 7 - Modo de colapso ao longo do tempo para os dois ensaios a 10014mm/s.

Ensaio	Tempo [ms]				
	0	5	10	15	20
1.14_10014_0.0					
1.14_10014_2.0					

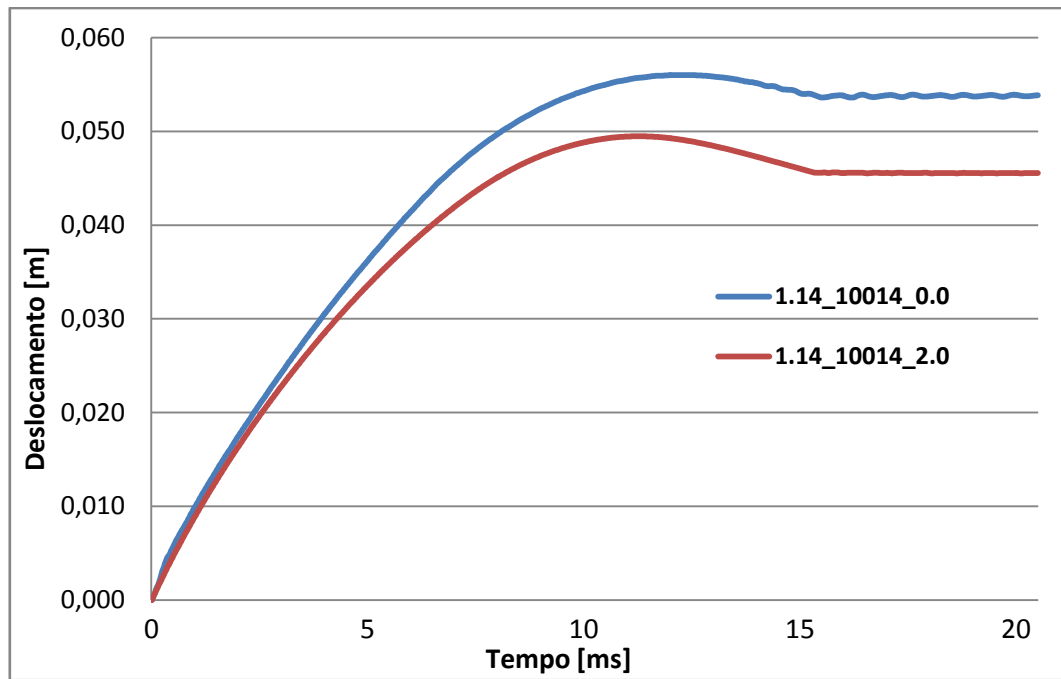


Figura 56 - Gráfico das curvas Deslocamento Vs Tempo (1.14_10014).

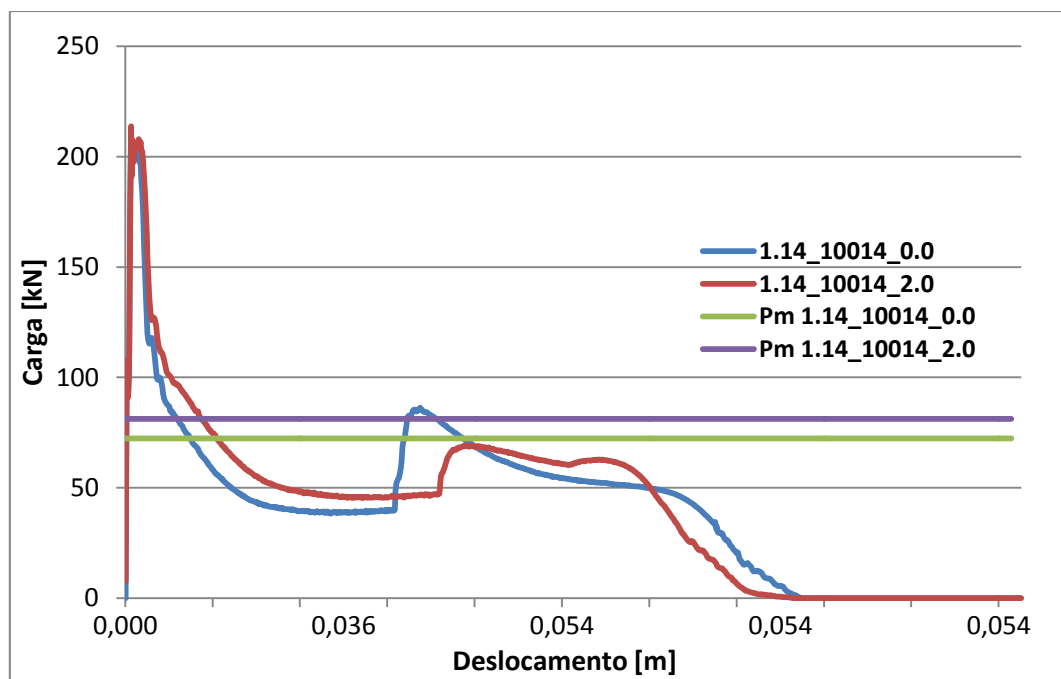
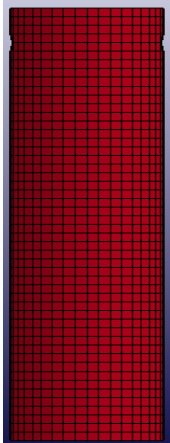


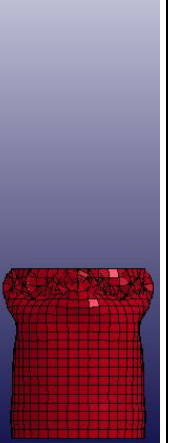
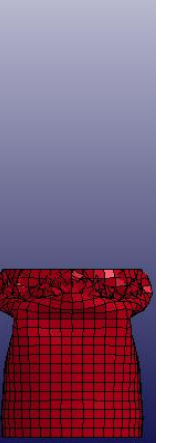
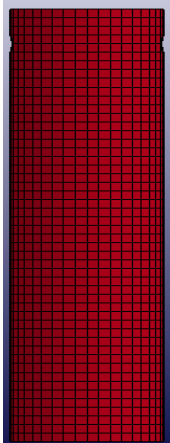


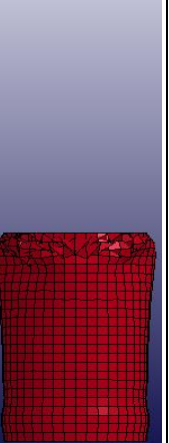
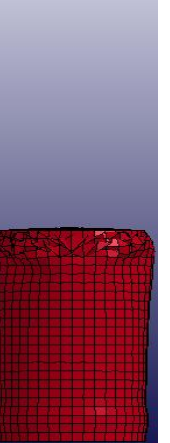


Figura 57 - Gráfico das curvas Carga Vs Deslocamento com indicação de Pm (1.14_10014).

Para velocidade de impacto de 17777 mm/s,

A tabela 8 apresenta uma comparação do modo de colapso da estrutura tubular ao longo do tempo para os dois ensaios, para a velocidade de impacto mais elevada.

Tabela 8 - Modo de colapso ao longo do tempo para os dois ensaios a 17777mm/s.

Ensaio	Tempo [ms]				
	0	5	10	15	20
1.14_17777_0.0					
1.14_17777_2.0					

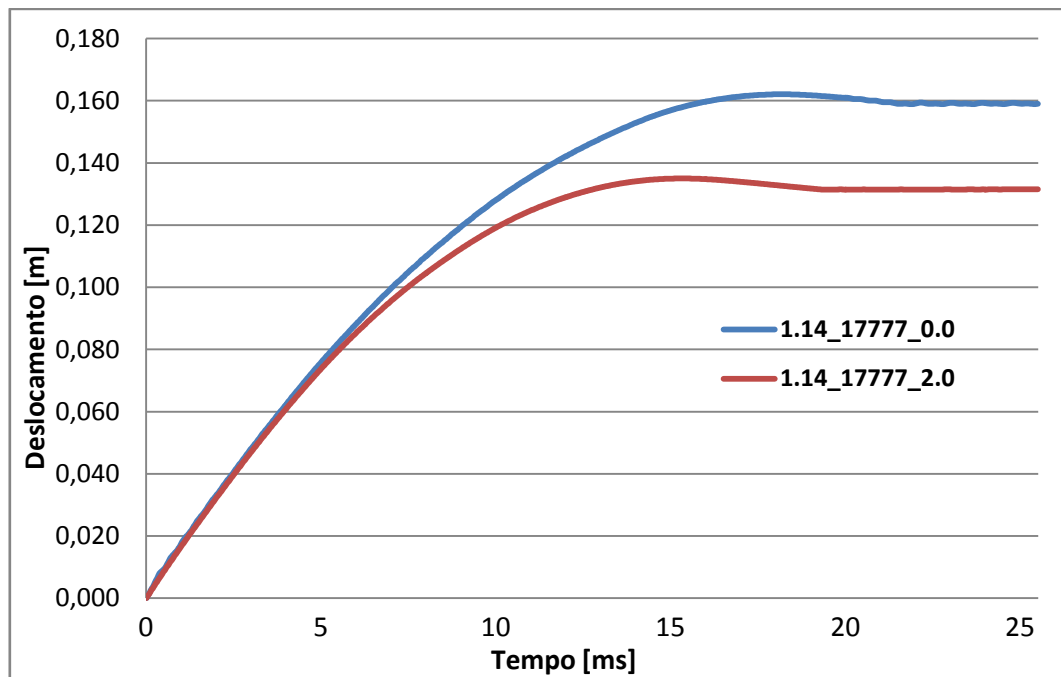


Figura 58 - Gráfico das curvas Deslocamento Vs Tempo (1.14_17777).

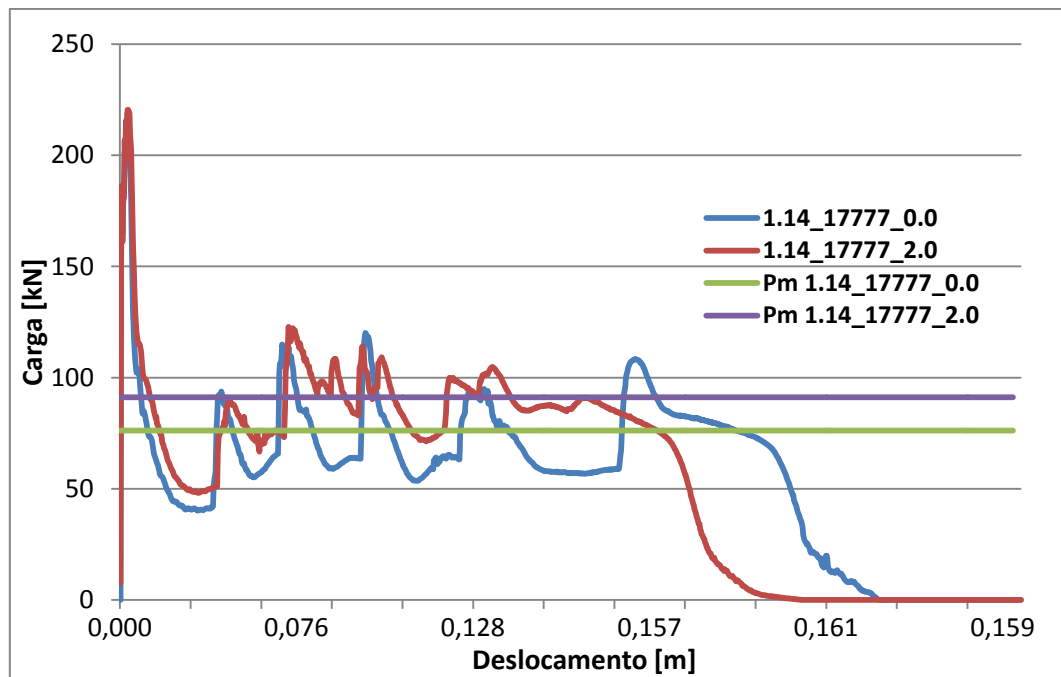


Figura 59 - Gráfico das curvas Carga Vs Deslocamento com indicação de Pm (1.14_17777).

4.2. Ensaio sobre Redução da Espessura de Parede

Numa **segunda fase**, foi realizado um estudo quanto à possibilidade de se reduzir a espessura da parede da estrutura. Era pretendido manter a resistência ao choque idêntica mediante a introdução de uma pressão interna de 20 bar na estrutura menos espessa, por forma a compensar a redução no material. Foram realizados vários ensaios para a velocidade superior (17777 mm/s), em que se foi reduzindo gradualmente a espessura da parede, com pressurização interna de 20 bar. O objectivo era comparar o deslocamento sofrido pela estrutura com 1.14mm de espessura sem pressão interna adicional, com o deslocamento sofrido pela nova estrutura mais fina com pressão interna de 20 bar. Obtiveram-se os seguintes resultados para a determinação da nova espessura de parede:

Tabela 9 - Redução da Espessura com base no deslocamento sofrido.

Velocidade [mm/s]	17777					
Pressão Interna [bar]	1bar	20bar				
Espessura Parede [mm]	1.14	1.08	1.06	1.05	1.045	1.04
δ_r [m]	0.159	0.152	0.155	0.158	0.159	0.160

Graficamente,

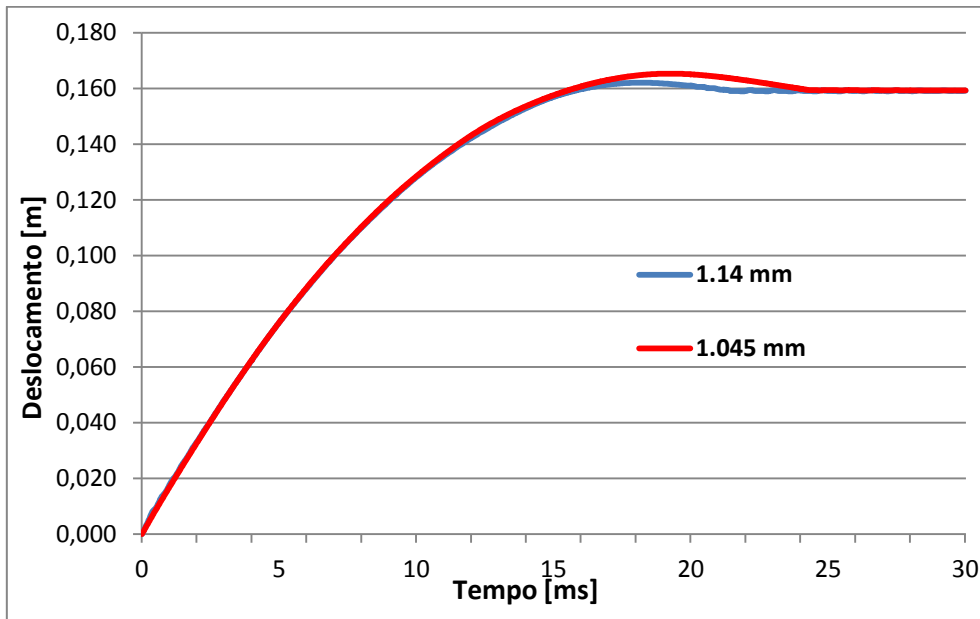


Figura 60 - Gráfico Deslocamento Vs Tempo para determinar a espessura.

Como se pode verificar, obtém-se praticamente o mesmo deslocamento final, para as mesmas condições de impacto axial (velocidade e massa da parede rígida iguais), para a estrutura de 1.14 mm de espessura sem pressão interna adicional e a de 1.045mm com 20bar internos. Assim sendo, passou-se a considerar uma nova estrutura com espessura de parede de 1.045mm. Nesta configuração, os resultados globais obtidos podem ser apresentados na seguinte tabela:

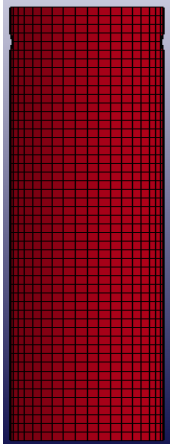
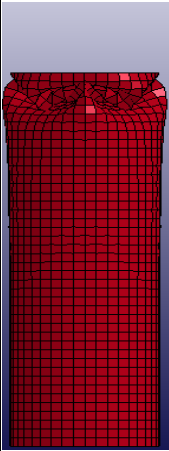



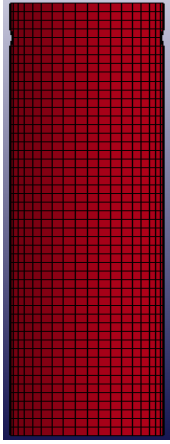
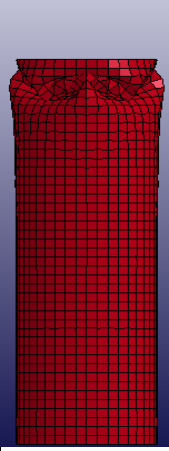
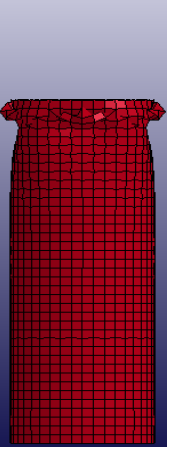
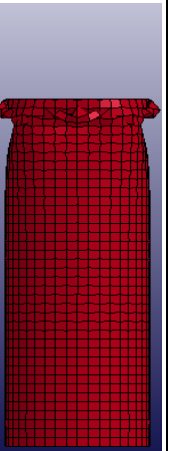
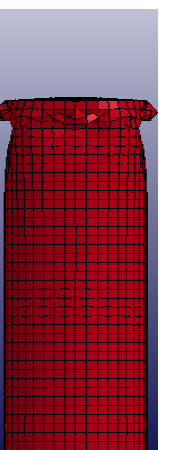
Tabela 10 - Resultados globais obtidos para as duas estruturas.

Ensaio	δ_f [mm]	E_a [kJ]	P_m [kN]	η [%]
1.14_10014_0.0	54	3,9	72,4	64,8
1.14_10014_0.5	51	3,8	74,8	66,9
1.14_10014_1.0	49	3,7	76,9	68,9
1.14_10014_1.5	47	3,7	79,0	70,8
1.14_10014_2.0	46	3,7	82,0	73,5
1.14_17777_0.0	159	12,1	76,0	68,1
1.14_17777_0.5	153	11,9	78,1	69,9
1.14_17777_1.0	149	11,9	80,2	71,8
1.14_17777_1.5	144	11,9	82,6	73,9
1.14_17777_2.0	131	11,9	90,7	81,3
1.045_10014_0.0	67	3,9	58,6	57,1
1.045_10014_0.5	63	3,8	60,3	58,8
1.045_10014_1.0	60	3,8	62,9	61,4
1.045_10014_1.5	57	3,8	65,8	64,2
1.045_10014_2.0	55	3,8	68,8	67,1
1.045_17777_0.0	189	12,1	64,0	62,4
1.045_17777_0.5	181	11,9	66,2	64,6
1.045_17777_1.0	172	11,9	69,3	67,6
1.045_17777_1.5	169	11,9	70,6	68,9
1.045_17777_2.0	159	11,9	74,6	72,8

Tal como foi feito anteriormente, para esta nova espessura de 1.045mm também pode ser realizada uma comparação sobre o efeito da introdução dos 20bar na estrutura, para ambas as velocidades de impacto, através da comparação visual do modo de colapso ao longo do tempo (tabela 11) bem como das suas curvas deslocamento Vs tempo e carga Vs deslocamento (figura 61 e 62, respectivamente).

Para velocidade de impacto de 10014 mm/s,

Tabela 11 - Deformação no tempo para os dois ensaios a 10014mm/s.

Ensaio	Tempo [ms]				
	0	5	10	15	20
1.045_10014_0.0					
1.045_10014_2.0					

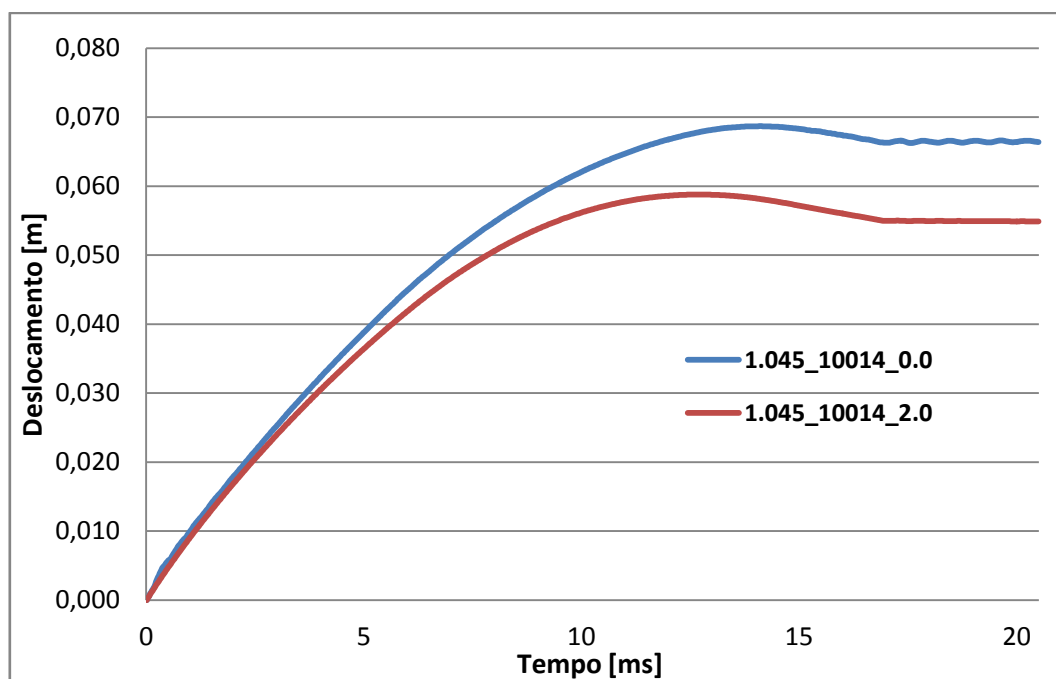


Figura 61 - Gráfico das curvas Deslocamento Vs Tempo (1.045_10014).

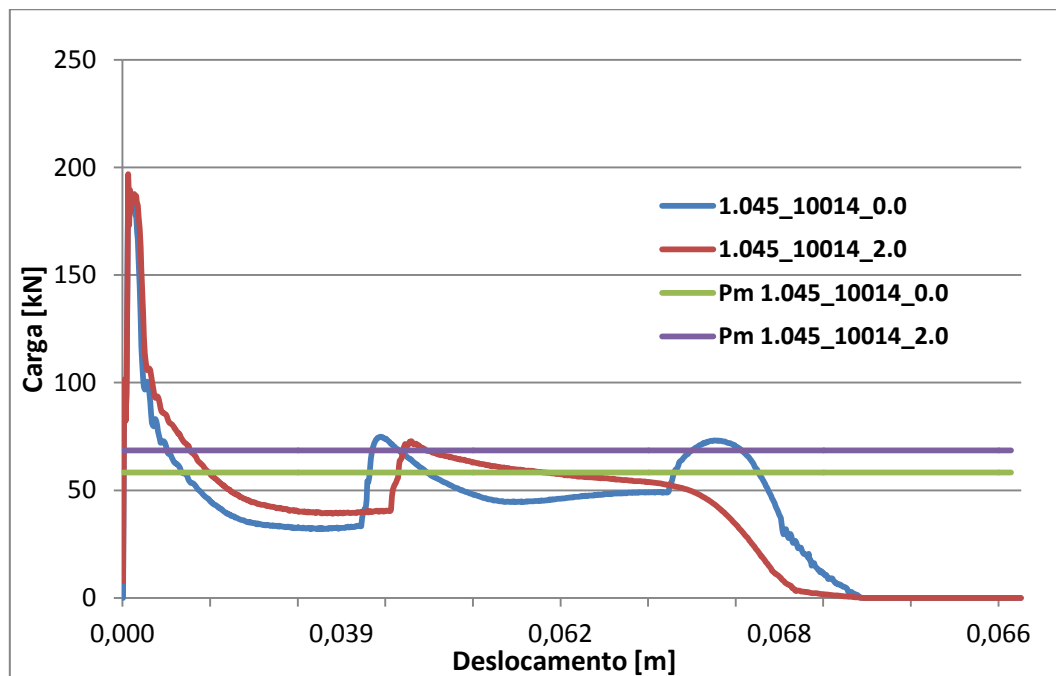
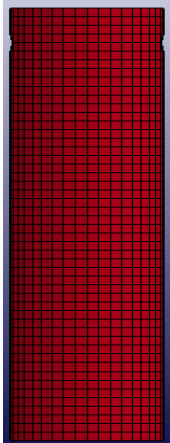

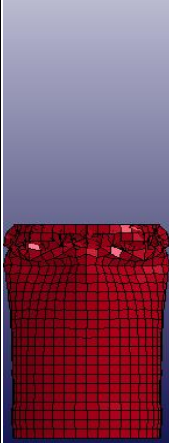
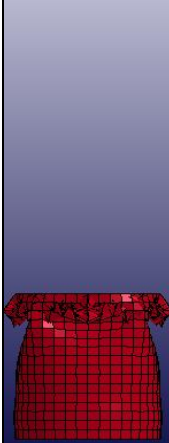
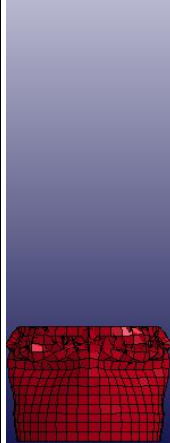
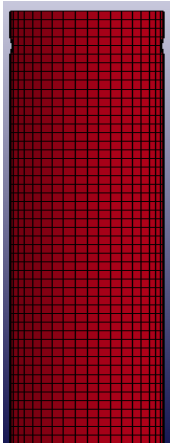
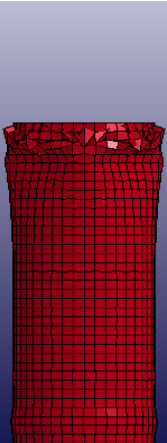

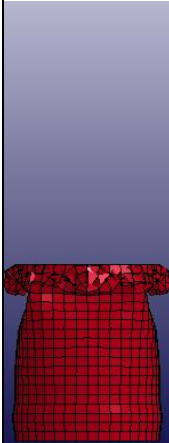
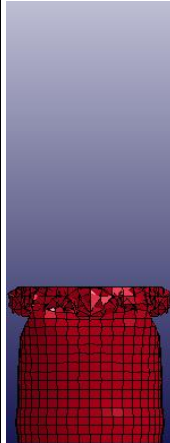


Figura 62 - Gráfico das curvas Carga Vs Deslocamento com indicação de Pm (1.045_10014).

Para velocidade de impacto de 17777 mm/s,

Tabela 12 - Modo de colapso ao longo do tempo para os dois ensaios a 17777 mm/s.

Ensaio	Tempo [ms]				
	0	5	10	15	20
1.045_17777_0.0					
1.045_17777_2.0					

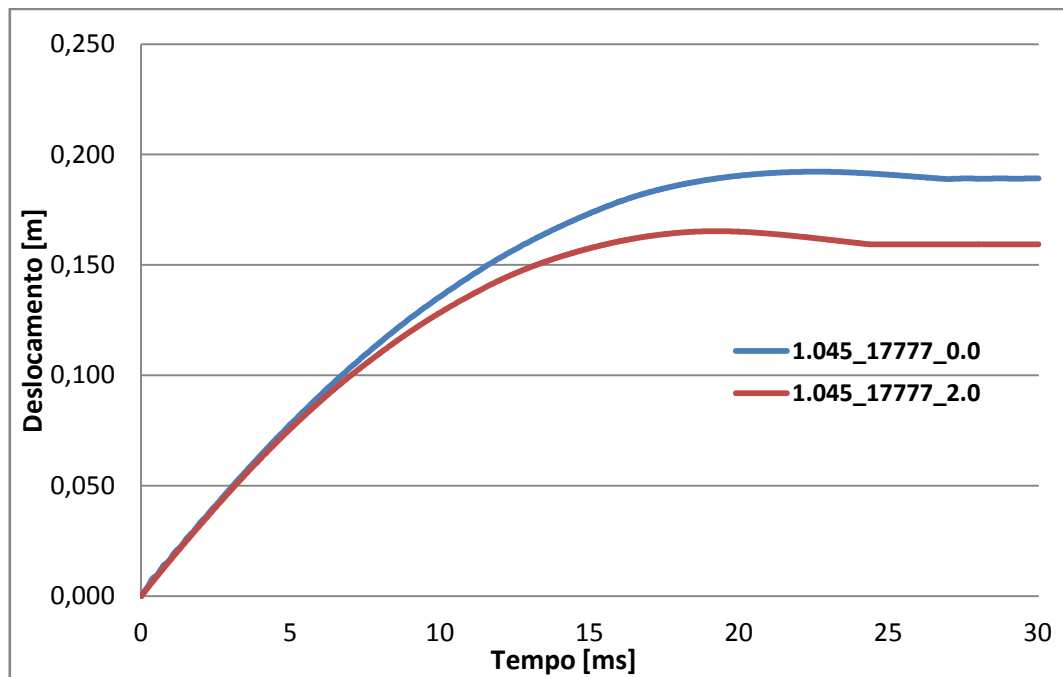


Figura 63 - Gráfico das curvas Deslocamento Vs Tempo (1.045_17777).

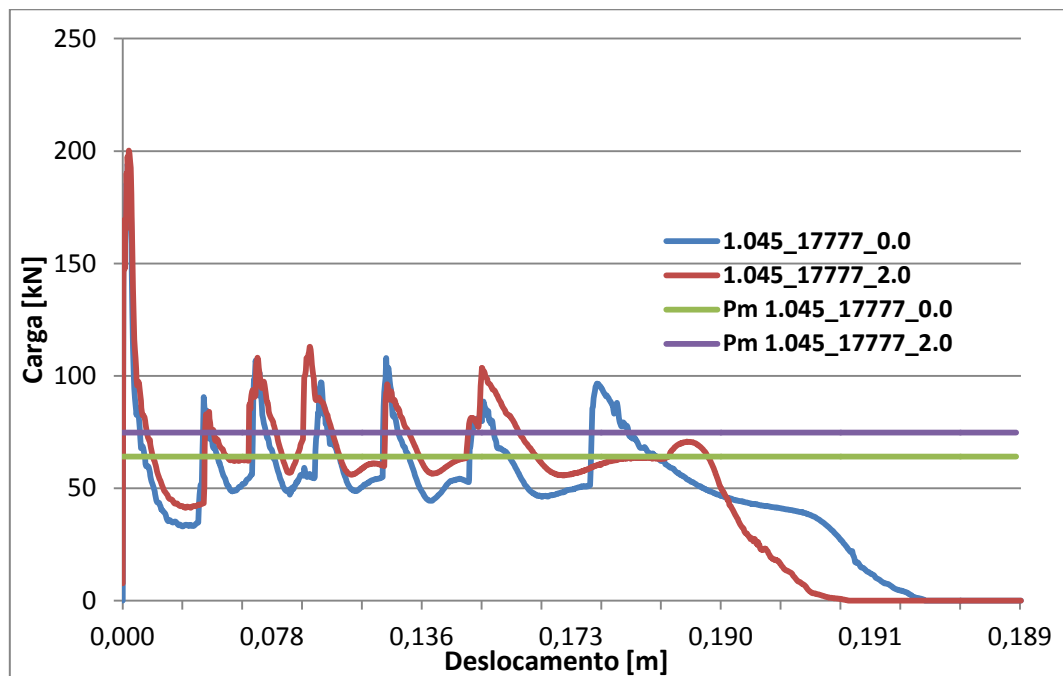


Figura 64 - Gráfico das curvas Carga Vs Deslocamento com indicação de Pm (1.045_17777).

4.3. Comparação de Resultados

Tendo em conta os resultados obtidos na simulação numérica para as duas estruturas consideradas, nomeadamente a de espessura de parede de 1.14mm e a de 1.045mm, foi de especial importância a realização de uma comparação dos resultados não pressurizados da primeira e os resultados com pressão interna adicional de 20 bar da segunda. Isto é, o objectivo principal deste trabalho, passava por reduzir a espessura da parede da estrutura tubular circular inicial, mantendo a resistência ao choque praticamente idêntica, com recurso a pressurização interna da estrutura mais fina. Numa tentativa de validar os resultados obtidos, foi realizada uma comparação dos ensaios sem pressão e com pressão 20bar, das estruturas 1.14mm e 1.045mm, respectivamente. Assim, foram comparados os ensaios:

➤ **1.14_10014_0.0 Vs 1.045_10014_2.0**

➤ **1.14_17777_0.0 Vs 1.045_17777_2.0**

1.14_10014_0.0 Vs 1.045_10014_2.0,

Na tabela 13, encontram-se os resultados obtidos nestes dois ensaios, para o deslocamento final (δ_f), a energia absorvida (E_a), a carga média (P_m) e a eficiência da estrutura para absorção de energia (η).

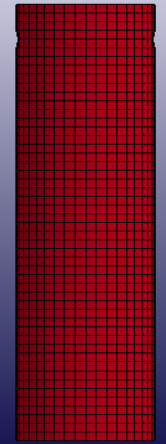
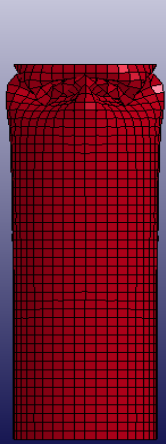

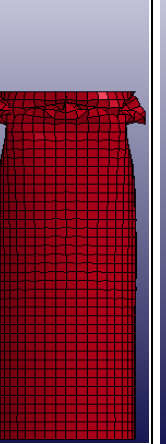
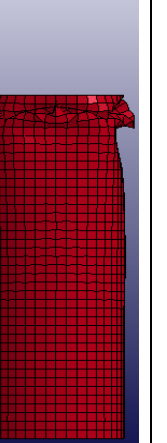
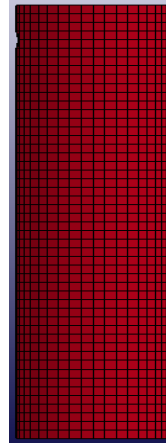
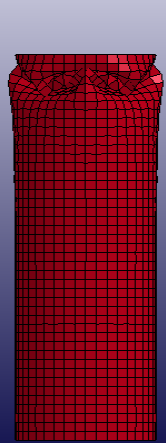
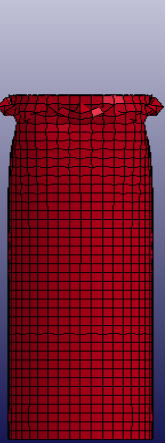
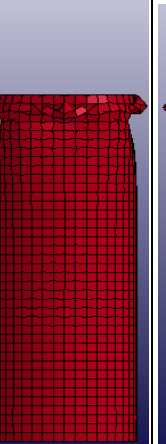
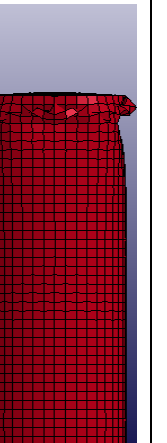
Tabela 13- Comparação de resultados obtidos nos ensaios a 10014mm/s.

Ensaio	δ_f[m]	E_a [kJ]	P_m [kN]	η[%]
1.14_10014_0.0	0,0539	3,9	72,4	64,8
1.045_10014_2.0	0,0548	3,8	68,8	67,1

Como seria de esperar, obtiveram-se resultados idênticos para as duas estruturas submetidas a impacto axial com velocidade de 10014 mm/s (36 km/h). Verifica-se, para o deslocamento final uma diferença de apenas 0.9mm, praticamente a mesma energia absorvida e carga média nas duas estruturas, e um pequeno aumento de cerca de 2% da eficiência para a absorção de energia na estrutura menos espessa.

Na tabela 14 pode-se ver o modo de colapso ao longo do tempo para a velocidade indicada (10014 mm/s).

Tabela 14 - Comparação do modo de colapso no tempo para os dois ensaios a 10014mm/s.

Ensaio	Tempo [ms]				
	0	5	10	15	20
1.14_10014_0.0					
1.045_10014_2.0					

Podem-se apresentar as semelhanças nas curvas de Deslocamento Vs Tempo e Carga Vs Deslocamento, através dos gráficos:

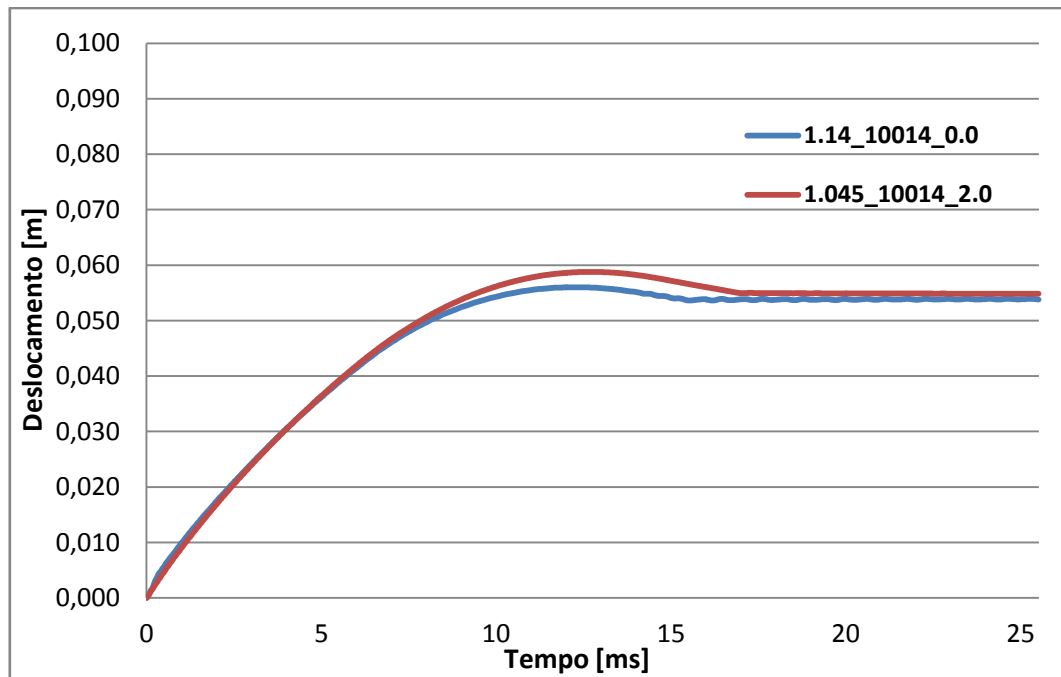


Figura 65 - Gráfico da comparação das curvas Deslocamento Vs Tempo (1.14_10014 Vs 1.045_10014).

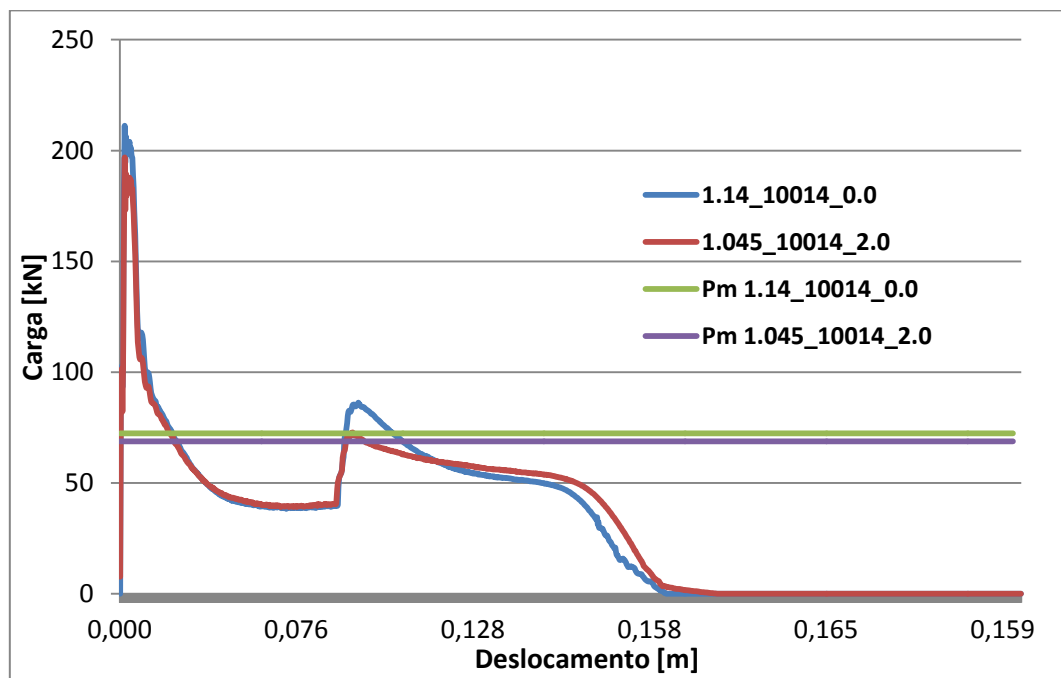


Figura 66 - Gráfico da comparação das curvas Carga Vs Deslocamento com indicação de Pm (1.14_10014 Vs 1.045_10014).

1.14_17777_0.0 Vs 1.045_17777_2.0,

Na tabela 15, encontram-se os resultados obtidos nestes dois ensaios, para o deslocamento final (δ_f), a energia absorvida (E_a), a carga média (P_m) e a eficiência da estrutura para absorção de energia (η).

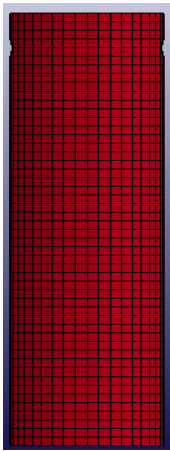


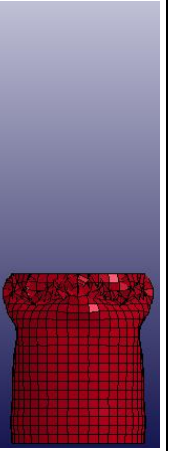
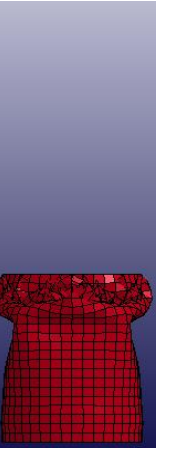
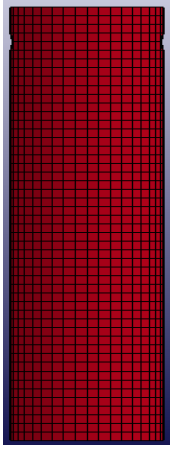
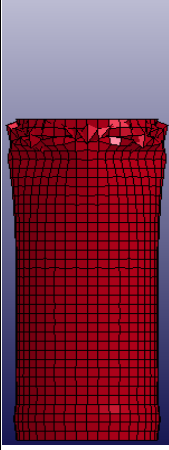



Tabela 15 - Comparação de resultados obtidos nos ensaios a 17777mm/s.

Ensaio	δ_f [m]	E_a [kJ]	P_m [kN]	η [%]
1.14_17777_0.0	0,1592	12,1	76,1	68,1
1.045_17777_2.0	0,1593	11,9	74,6	72,8

Mais uma vez, obtiveram-se resultados idênticos para as duas estruturas submetidas a impacto axial com velocidade de 17777 mm/s (64 km/h). Verifica-se, para o deslocamento final uma diferença de apenas 0.1mm, praticamente a mesma energia absorvida e carga média nas duas estruturas, e um pequeno aumento de cerca de 5% da eficiência para a absorção de energia na estrutura menos espessa.

Na tabela 16 pode-se ver a comparação da deformação ao longo do tempo destes dois ensaios, para a velocidade indicada (17777 mm/s). As figuras 67 e 68 apresentam as semelhanças nas curvas de Deslocamento Vs Tempo e Carga Vs Deslocamento, respectivamente.

Tabela 16 - Comparação da deformação no tempo para os dois ensaios a 17777mm/s.

Ensaio	Tempo [ms]				
	0	5	10	15	20
1.14_17777_0.0					
1.045_17777_2.0					

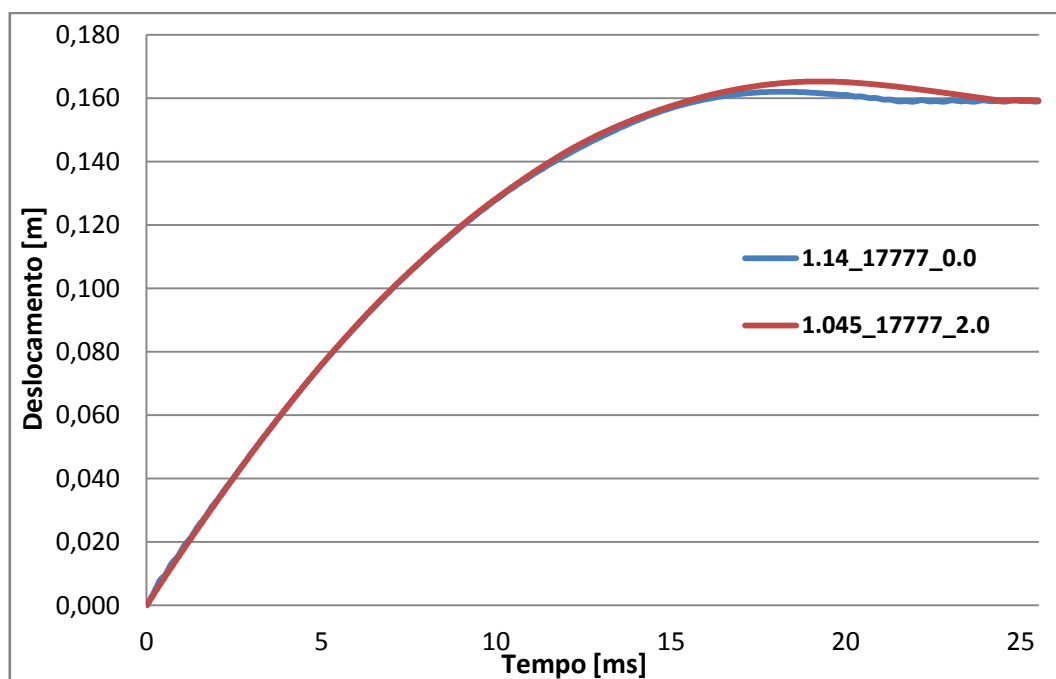


Figura 67 - Gráfico da comparação das curvas Deslocamento Vs Tempo (1.14_17777 Vs 1.045_17777).

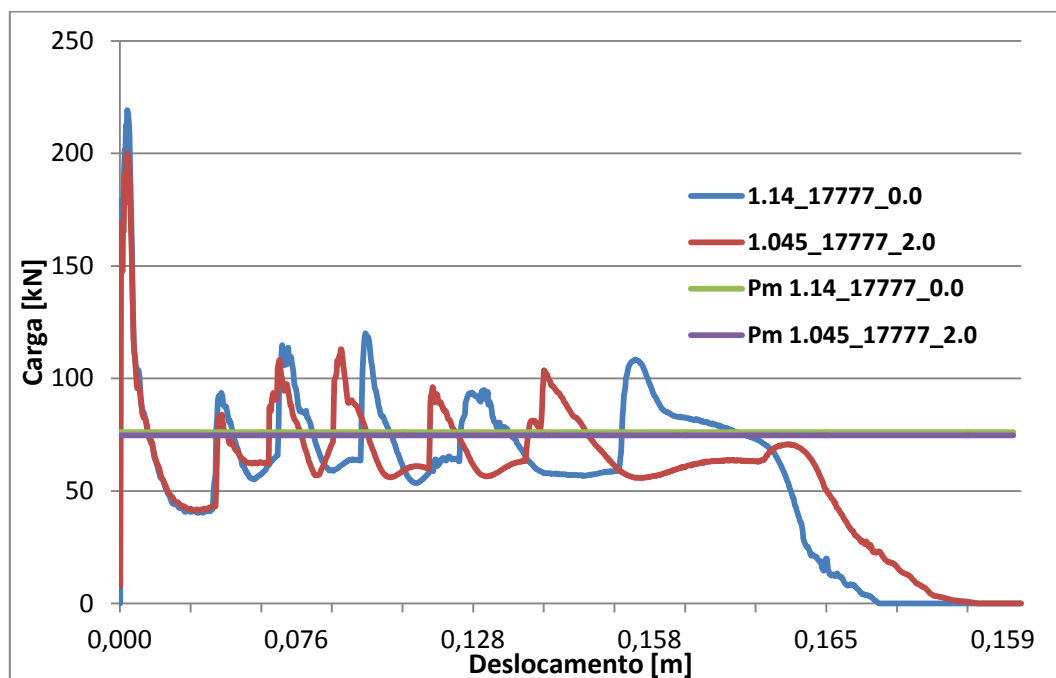


Figura 68 - Gráfico da comparação das curvas Carga Vs Deslocamento com indicação de Pm (1.14_17777 Vs 1.045_17777).

4.4. Cálculo da Redução de Peso da Estrutura

Validados os resultados obtidos, pode-se efectuar o cálculo relativo ao ganho em termos de redução do peso da estrutura. Estrutura essa que responderá de forma semelhante quando submetida a impacto axial, para as duas vertentes 1.14mm e 1.045mm. Nas tabelas 17 e 18 estão as características geométricas das duas estruturas estudadas.

Tabela 17 - Características geométricas da estrutura de 1.14mm de espessura.

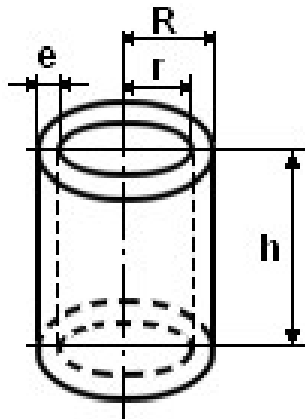
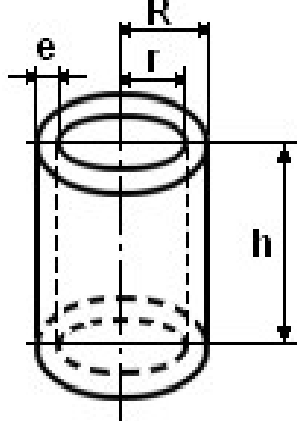
Geometria da Estrutura Cilíndrica 1,14mm			
	[mm]	[m]	
Comprimento (h)	250	0,25000	
Raio Exterior (R)	35	0,03500	
Raio Interior (r)	33,86	0,03386	
Espessura (e)	1,14	0,00114	
Área Secção Tubular	246,49	0,0002465	
	[mm ³]	[m ³]	
Volume	61622,814	0,0000616	
	[Ton]	[kg]	
Peso	0,000455	0,4548	

Tabela 18 - Características geométricas da estrutura de 1.045mm de espessura.

Geometria da Estrutura Cilíndrica 1,045mm			
	[mm]	[m]	
Comprimento (h)	250	0,25000	
Raio Exterior (R)	35	0,03500	
Raio Interior (r)	33,955	0,03396	
Espessura (e)	1,045	0,001045	
Área Secção Tubular	226,26	0,0002263	
	[mm ³]	[m ³]	
Volume	56565,510	0,0000566	
	[Ton]	[kg]	
Peso	0,000	0,4175	
Redução Peso [%]	8,21		

Como se pode verificar, existe uma redução de 8.21% no peso da estrutura, resultante da redução da espessura de parede da mesma.

Um dispositivo pirotécnico de um *airbag*, real e utilizado no volante do condutor é constituído pelo químico explosivo e uma caixa metálica protectora. Este conjunto pode pesar em média 0,415kg, segundo uma fonte não mencionável (fonte confidencial).

No que respeita às longarinas frontais de um veículo, a sua geometria é variável de modelo para modelo, sendo que a sua massa pode ser de 15 a 20kg, segundo uma empresa de recolha e tratamento de sucata e alguns mecânicos de reparação automóvel contactados. Se considerarmos 15kg, como o peso de uma longarina bastante comum, 8,21% dessa massa representa 1,232Kg, isto é, extrapolando a aplicação deste trabalho numa longarina real, com esta estratégia conseguir-se-ia reduzir o peso total da mesma em cerca de 0,817kg.

5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

O objectivo da elaboração deste trabalho recaía sobre um estudo da simulação numérica em estruturas tubulares de paredes finas com secção transversal circular, submetidas a solicitações de impacto axial. Pretendia-se simular uma longarina frontal de um veículo automóvel submetida a impacto axial.

Este estudo apresenta resultados relativamente a ensaios numéricos efectuados com recurso a um *software* específico, baseado no método dos elementos finitos, o LS-DYNA™. Esses ensaios possuem características dinâmicas, sendo consideradas duas velocidades de impacto distintas, uma referente a um *crash test* de impacto frontal da agência Euro NCAP ($64 \text{ km/h} = 17777 \text{ mm/s}$) e a outra refere-se à velocidade de impacto observada num *Drop test* realizado na torre de queda do laboratório de ensaio de materiais (LEM) da Universidade do Minho ($36 \text{ km/h} = 10014 \text{ mm/s}$). Deste último ainda se considerou como referencia a massa do impacto de 76 kg (massa da parede rígida na simulação numérica). Foram consideradas duas geometrias tubulares circulares, diferindo entre si apenas na espessura da parede. A primeira foi definida logo de início e continha um comprimento de 250mm, um diâmetro de 70mm e uma espessura de parede de 1.14mm. A segunda geometria foi obtida como resultado de um estudo efectuado à primeira sobre a possibilidade de se reduzir a sua espessura da parede, recorrendo-se a pressurização interna como medida compensatória. O material que constituía as estruturas foi considerado o mesmo: aço inoxidável austenítico da serie H400. Foram analisados vários valores para a pressão interna, sendo que o máximo considerado baseia-se no estado da arte da tecnologia de *airbags* e foi 20 bar.

Numa primeira fase, foi então realizado um estudo sobre uma simulação numérica de uma estrutura tubular circular com 1.14mm de espessura, onde se enquadrava a hipótese de se utilizar pressurização interna da mesma. O objectivo seria estudar a influência da pressão no interior da estrutura para aplicações de *crashworthiness*. Com os resultados obtidos, conclui-se que é possível aumentar a resistência ao choque da estrutura com a introdução de pressão no seu interior o que viria a beneficiar a sua utilização em aplicações de *crashworthiness*.

A deformação diminuía com o aumento da pressão interna, sendo que a carga média aumentava, conforme o esperado.

No caso da Energia absorvida esta foi praticamente a mesma, o que nos leva a concluir que foram cometidos erros na simulação numérica (pois deveria ser a mesma). Esses erros estarão relacionados com as limitações impostas por parte da licença do *software* utilizada, nomeadamente com número de elementos de malha limitados a 10000.

No que diz respeito à eficiência da estrutura para absorção de energia, esta também aumentava com a introdução da pressão interna.

Na fase seguinte, estudou-se a possibilidade de se efectuar uma redução na espessura da parede da estrutura tubular, utilizando-se uma pressão interna de 20 bar de forma a tentar compensar essa redução. Foram realizadas comparações entre a estrutura mais espessa, sem pressão no seu interior, e a mais fina com 20 bar de pressão interna. Os resultados obtidos permitem-nos concluir que é viável efectuar essa redução à espessura da parede e obter uma resistência ao choque praticamente idêntica à de espessura maior sem pressão adicional no seu interior. Para a mesma velocidade de impacto, tanto para a menor como para a maior, a deformação total sofrida pela estrutura é idêntica, a energia absorvida no impacto foi praticamente a mesma e apesar de uma ligeira diminuição da carga média, verifica-se um aumento na eficiência da estrutura para absorção de energia.

No que respeita à simulação numérica efectuada pode-se dizer que esta é viável, tendo em conta que os resultados estão de acordo com o esperado pela revisão bibliográfica.

Quanto ao programa informático utilizado é relativamente fácil de se manusear depois de se ter adquirido um conhecimento um pouco detalhado sobre o seu uso. Para esse efeito, foi criado um tutorial que explica o funcionamento do pré-processador, sendo disponibilizado em anexo (Anexo A). Os resultados obtidos neste trabalho possibilitaram a abertura de novos horizontes para desenvolvimentos futuros, nomeadamente na questão da sua aplicabilidade na prática.

Desenvolvimentos Futuros,

A construção de um modelo experimental efectuado à escala de um modelo real de uma longarina existente no mercado actual seria uma boa forma de estudar com mais pormenor a questão da viabilidade da utilização desta técnica de absorção de energia com recurso a pressurização interna. Por si só, a questão da realização de ensaios experimentais mesmo com recurso a modelos aproximados, idênticos às estruturas utilizadas neste trabalho, seriam uma boa forma de comparação dos resultados aqui obtidos.

O tipo de elemento pirotécnico será, como foi descrito neste trabalho, muito semelhante aos sistemas actuais utilizados nos airbag. Contudo poderá ser necessário, estudar a massa que será obrigatoriamente adicionada no veículo, referente à introdução desse elemento na estrutura (foi considerado um exemplo neste trabalho com cerca de 0,415kg). É recomendado verificar se ainda assim se obtém uma redução viável no peso do componente pressurizado, que compense a introdução desta massa adicional no veículo. Recorde-se que a geometria das longarinas (sejam elas frontais ou traseiras) varia de veículo para veículo, pelo que cada caso será um considerado um caso de estudo independente. Existem no entanto, como é sabido, estruturas deste tipo comuns a diversos veículos, isto é, por vezes os fabricantes “partilham” entre si componentes estruturais, normalmente fabricados em empresas secundárias. Seria então fundamental num futuro próximo estudar, experimentalmente, uma longarina frontal e um dispositivo pirotécnico, reais e de uso comum em vários veículos do mercado actual.

6. Referências

- [1] Observatório de Segurança Rodoviária, “Relatório Anual de Sinistralidade Ano 2010”, Autoridade Nacional Segurança Rodoviária, 2010.
- [2] The Safety Concept of the New Golf. Company Target Safety Quality. VWAG
- [3] <http://forum.autohoje.com/forum-geral/33531-topico-dos-crash-tests-actualizado-em-14-5-2012-a-104.html>, in 04/01/2012.
- [4] Nohr, M.; Blume, K., “Crash adaptive vehicle structures and components”, DAIMLER, Sindelfingen, 2004.
- [5] Shakeri M., Mirzaeifar R. e Salehghaffari S., “New insights into the collapsing of cylindrical thin-walled tubes unde axial impact load”, J. Mechanical Engineering Science Proc. IMechE, Vol. 221 Part C, pp. 869-885, 2007.
- [6] http://www.euroncap.com/tests/bmw_3_series_2005/225.aspx in 04/01/2012.
- [7] <http://www.euroncap.com/Content-Web-Page/824956bc-6a5e-4ddd-af9c-d500167327b0/meet-the-drivers.aspx> in 04/01/2012.
- [8] Peixinho, N.,” Introdução à Mecânica do Impacto”, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, 2004.
- [9] N. Jones, Structural Impact, Cambridge University Press, 1989.
- [10] E. Markiewicz; P. Ducrocq; P. Drazetic, “An inverse approach to determine the constitutive model parameters from axial crushing of thin-walled square tubes”, International Journal of Impact Engineering, No. 6, pp. 433-449,1998.
- [11] Marsolek J, Reimerdes HG. “Energy absorption of metallic cylindrical shells with induced non-axisymmetric folding patterns”, International Journal of Impact Engineering 2004;30:1209–23.

[12] Aljawi, A., “Numerical Simulation of Axial Crushing of Circular Tubes”, Eng. Sci., vol. 14 no. 2, pp. 1-17, 2002.

[13] Kim, D-K., Lee, S., "Impact Energy Absorption of 6061 Aluminum Extruded Tubes with Different Cross-Sectional Shapes," Materials and Design, Vol. 20, pp. 41-49, 1999.

[14] N. Peixinho, Study of visco-plasticity models for the prevision of mechanical behaviour of high strength steels subjected to impact, tese de doutoramento, Universidade do Minho, 2004.

[15] Ambrosio, J. A. C, Abramowicz, W., Jones, N. and King, A., “Crashworthiness of Transportation Systems: Current Issues and Future Trends,” In Structures under Shock and Impact, Ed. Jones, N., Talaslidis, D. G., Brebbia, C. A., and Manolis, G. D., WIT Press, United Kingdom, 1998.

[16] Paul Du Bois, Clifford C. Chou, Bahig B. Fileta, Tawfik B. Khalil, Albert I. King, Hikmat F. Mahmood, Harold J. Mertz, Jac Wismans, “Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection”, American Iron and Steel Institute, Southfield.

[17]http://www.emercedesbenz.com/Nov08/12_001507_Mercedes_Benz_TecDay_Special_Feature_PRE_SAFE_And_PRE_SAFE_Brake.html in 11/01/2012.

[18] http://www.thecarconnection.com/news/1043141_mercedes-benz-esf-safety-car-more-better-smarter-airbags in 11/01/2012.

[19] Fäult S., Hedin J., Larsson J., Oliveira N., Carlsson B., “Inflateable Side Impact Beams in Martensitic Steel”, SAE International Technical Papers, 2011.

[20] <http://www.euroncap.com/testprocedures.aspx> in 16/01/2012.

[21] <http://www.euroncap.com/tests/frontimpact.aspx> in 16/01/2012.

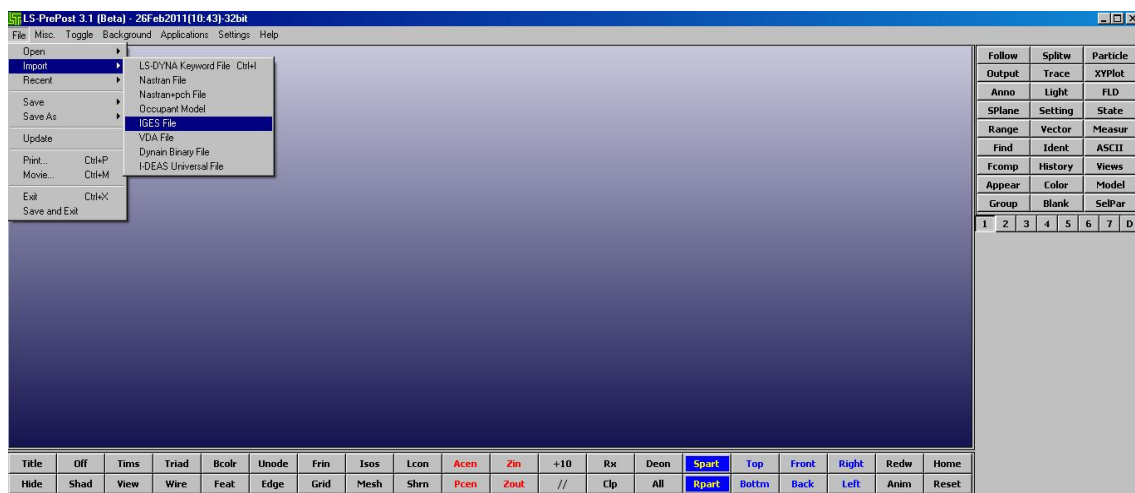
- [22]<http://www.euroncap.com/Content-Web-Page/106f41f7-d486-46bf-bfbc-80fb4c79f679/car-to-car-side-impact.aspx> in 16/01/2012.
- [23]<http://www.euroncap.com/Content-Web-Page/90769bbc-bb74-4129-a046-e586550c3ece/pole-side-impact.aspx> in 16/01/2012.
- [24] <http://www.lastautonews.com/last-auto-news/honda-civic-achieves-five-star-euro-ncap-honda-civic-achieves-five-star-euro-ncap/>, in 16/03/2012
- [25]<http://www.euroncap.com/Content-Web-Page/ed4ad09d-1d63-4b20-a2e3-39192518cf50/pedestrian-protection.aspx> in 16/01/2012.
- [26] <http://www.euroncap.com/Content-Web-Page/824956bc-6a5e-4ddd-af9c-d500167327b0/meet-the-drivers.aspx>
- [27] Devloo P., “SIMULAÇÃO NUMÉRICA”, Linguagem da Ciência, 2005.
- [28] www.oasys-software.com/dyna/en/software/ls-dyna_flyer_2007-12_A4-4pg.pdf in 20/02/2012.
- [29] Pam-Crash SolverReference Manual and Solver NotesManual, Version 2000. Pam System International, Paris, France, 2000.
- [30] MECALOG Les Algorithms Sophia Antipolis, France, RADIOSS Theory Manual 99, 1999.
- [31]Liao, X., Li, Q., Yang, X., Li, W. e Zhang, W., "A two-stage multi-objective optimisation of vehicle crashworthiness under frontal impact," International Journal of Crashworthiness Vol. 13, No. 3, pp. 279–288, 2008.
- [32] Livermore Software Technology Corporation, “Getting Started with LS-DYNA”, 2002.

- [33] Durães, M., "Aplicação de aço inoxidável em componentes para absorção de energia de impacto", Tese de mestrado, Universidade do Minho, 2007.
- [34] Tebecherani, C., "Aços inoxidáveis".
- [35] Peixinho N., Durães M., "Propriedades dinâmicas de aços de alta resistência para aplicações em crashworthiness", Conferencia Nacional de Dinâmica de Sistemas Multicorpo, Departamento Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, 2007
- [36] Marques, A., "Simulação Numérica do Comportamento ao impacto de componentes Metálicos", Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, 2009.
- [37] Livermore Software Technology Corporation, "LS-DYNA keywords user's manual", volume I, Version 971, 2007.

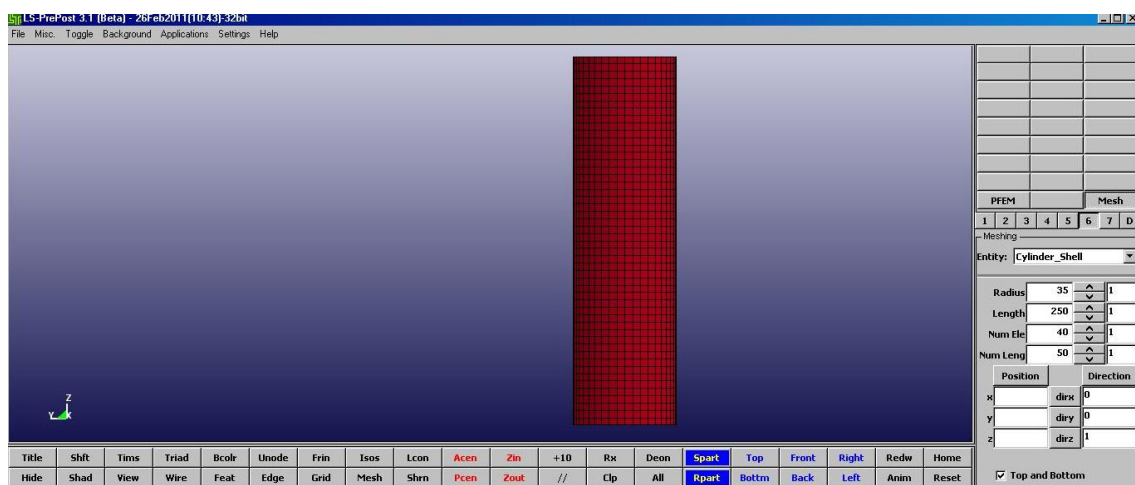
ANEXO A- Tutorial LS-DYNA™

Para que no futuro, quem estiver interessado em utilizar o programa informático LS-DYNA™ para replicação destes ensaios numéricos ou para que tenha uma maior facilidade em perceber o seu funcionamento, fica aqui o meu contributo com um pequeno tutorial relativo ao mesmo.

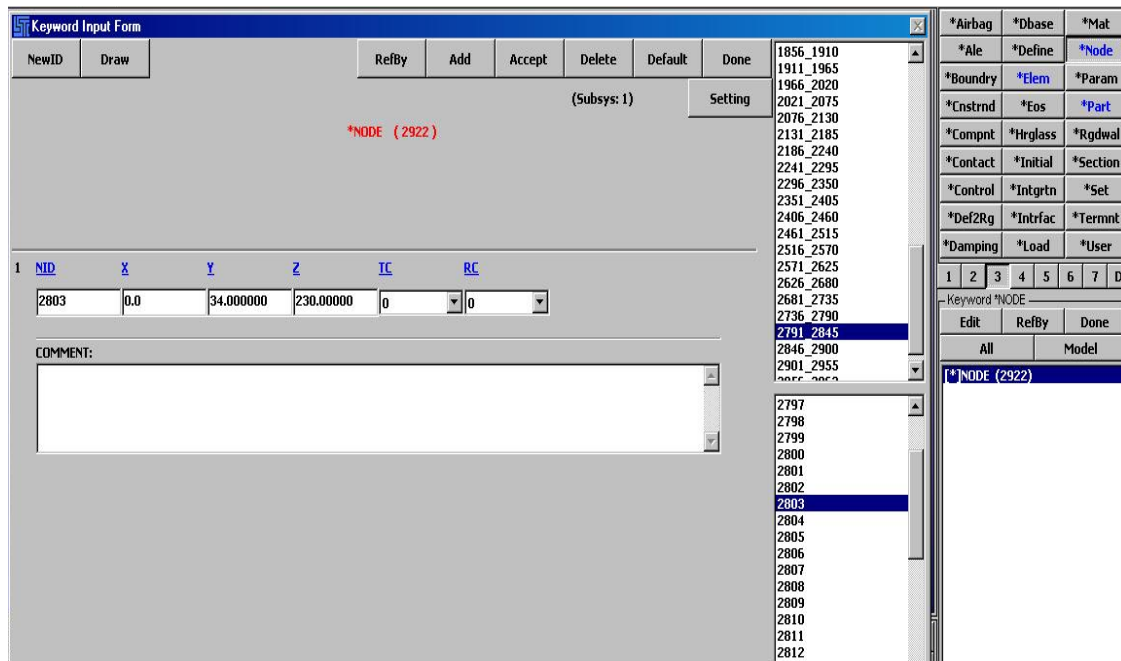
1ºPasso: O modelo estrutural pode ser efectuado em qualquer programa informático Cad/Cam como por exemplo o AutoCad™ e Solidworks™, tendo obrigatoriamente que o ficheiro ser gravado com a extensão IGES, para que possa ser importado para o LS-DYNA™.



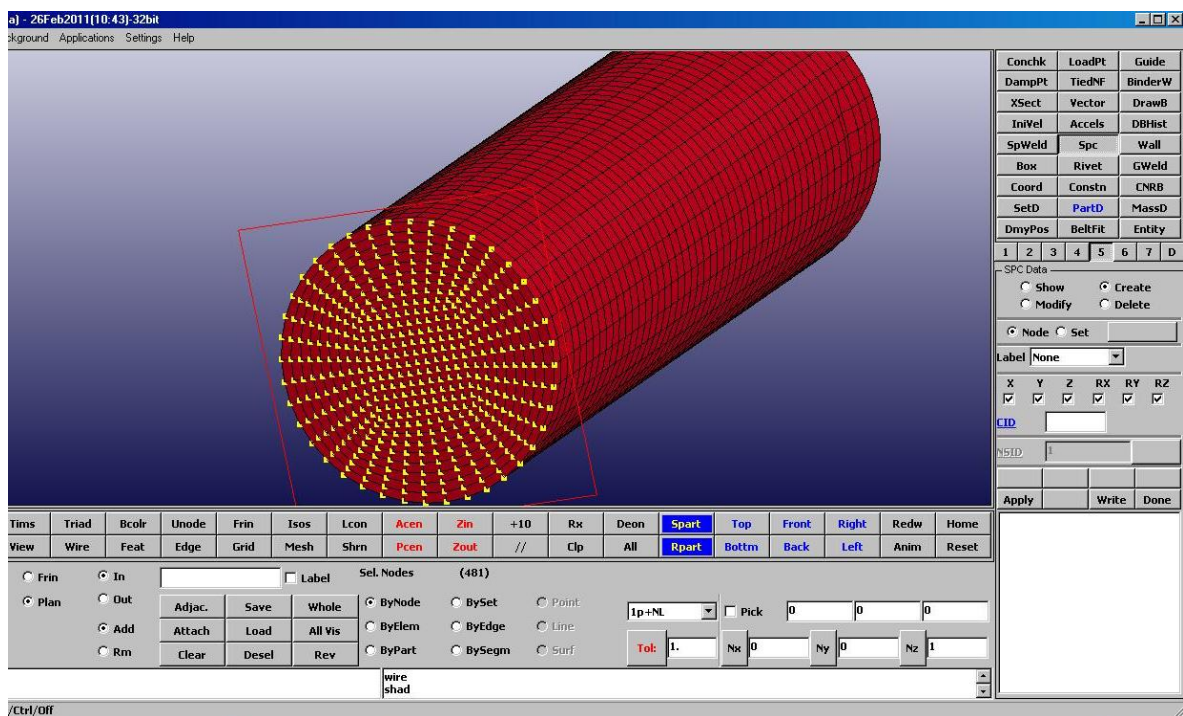
Caso se trate de uma geometria simples, pode ser utilizada a keyword Mesh directamente no LS-DYNA™.



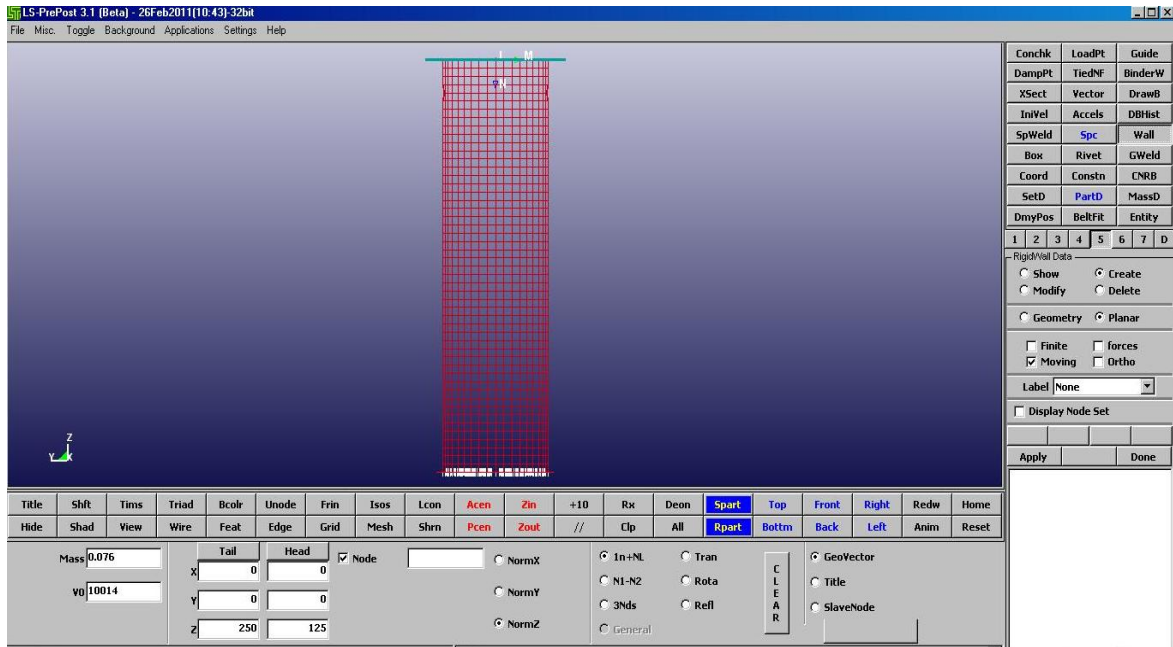
2ºPasso: Para construir os iniciadores de deformação utiliza-se a keyword Node e atribuem-se deslocamentos nos nós necessários.



3ºPasso: Para restringir a base utiliza-se a keyword SPC, repetindo-se os passos da figura seguinte.



4ºPasso: A aplicação da parede móvel é feita recorrendo-se à keyword Wall, escolhendo as características desejadas, neste caso para um ensaio de impacto, segue-se os passos da figura seguinte.



Recorre-se ainda à keyword Rgdwal para definir uma identidade para a parede móvel.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *PARAMETER (Subsys: 1) Setting

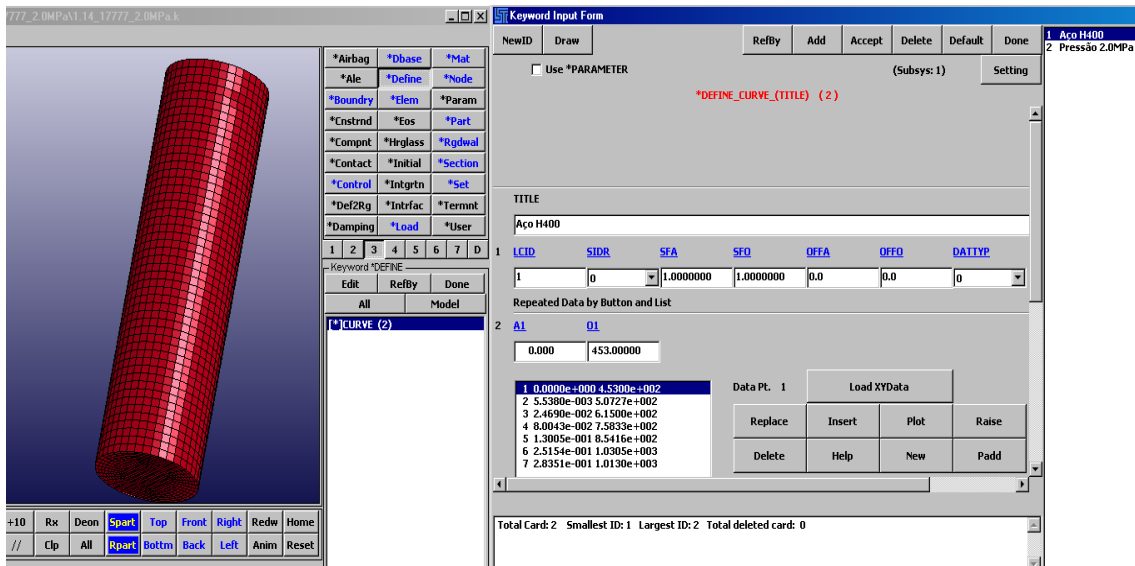
***RIGIDWALL_PLANAR_MOVING (1)**

1	ID	TITLE							
		1	Parede Móvel						
2	NSID	NSIDEX	BOXID	OFFSET	BIRTH	DEATH	RWKSF		
	0	0	0	0.0	0.0	1.000e+020	1.0000000		
3	XT	YT	ZT	XH	YH	ZH	FRIC	WVEL	
	0.0	0.0	250.00000	0.0	0.0	125.00000	1.0000000	0.0	
4	MASS	Y0							
	0.0760000	1.001e+004							

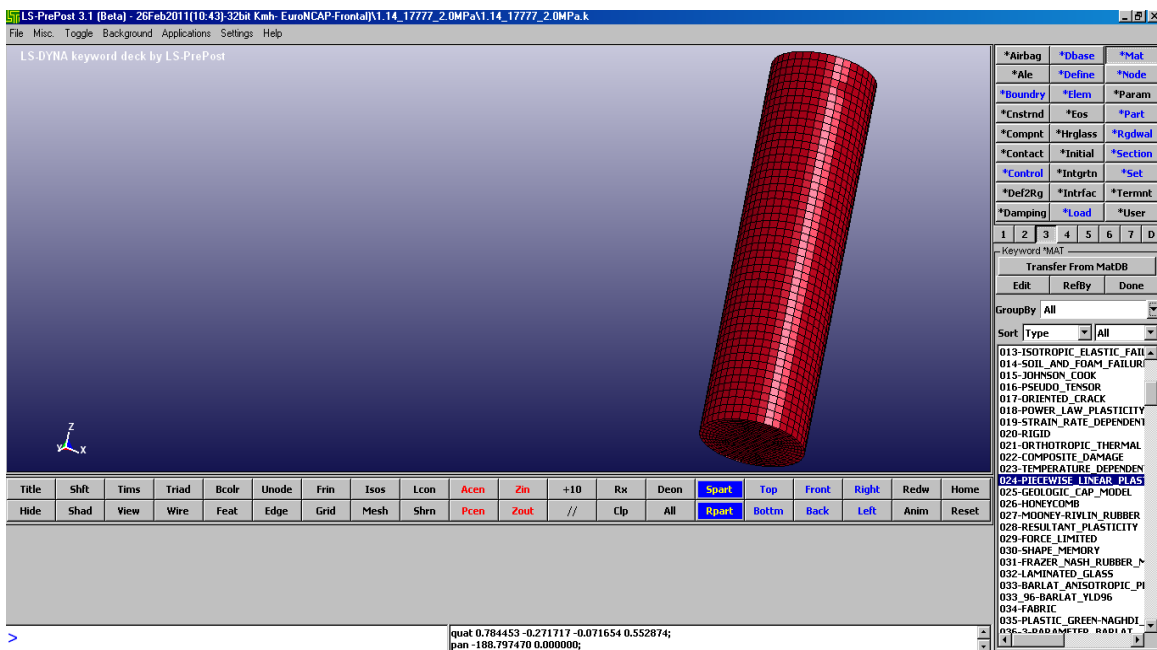
COMMENT:

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

5ºPasso: Definir a curvas tensão vs extensão do material e a curva de pressão interna caso seja aplicável no ensaio numérico. Note-se que para definir pressão interna os valores de pressão devem ser introduzidos com sinal negativo.



6ºPasso: Definição do material, seguir figuras seguintes



Keyword Input Form

NewID RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *PARAMETER (Subsys: 1) Setting

***MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (1)**

TITLE
Propriedades do Material

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
1	1	7.38e9	2.10e5	0.30	453.0	0.0	10.E+20	0.0

2	C	P	LCSS	LCSR	YP
1150	7.75	1	0	0.0	

3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

É necessário fazer a correspondência do material com a curva característica do mesmo, definida anteriormente. Para tal, clica-se em **LCSS** e faz-se a respectiva correspondência.

7ºPasso: Definição da secção, escolha do tipo de elemento de malha e definição da espessura da parede da estrutura, seguir passos da figura seguinte.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Sort/T1 Add Accept Delete Default Done

☐ Use *PARAMETER (Subsys: 1) Setting

***SECTION_SHELL_(TITLE) (1)**

TITLE
Espessura Casca_1.14mm

1	SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
1	1	2	1.0000000	5	1	0	0	1

2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
1.1400000	1.1400000	1.1400000	1.1400000	0.0	0.0	0.0	0	

Repeated Data by Button and List

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

1 Espessura Casca_1.14mm

*Airbag *Dbase *Mat
*Ale *Define *Node
*Boundry *Elem *Param
*Cnstrnd *Eos *Part
*Compnt *Hrglass *Rgdwal
*Contact *Initial *Section
*Control *Intgrtn *Set
*Def2Rg *Intrfac *Termnt
*Damping *Load *User

1 2 3 4 5 6 7 D

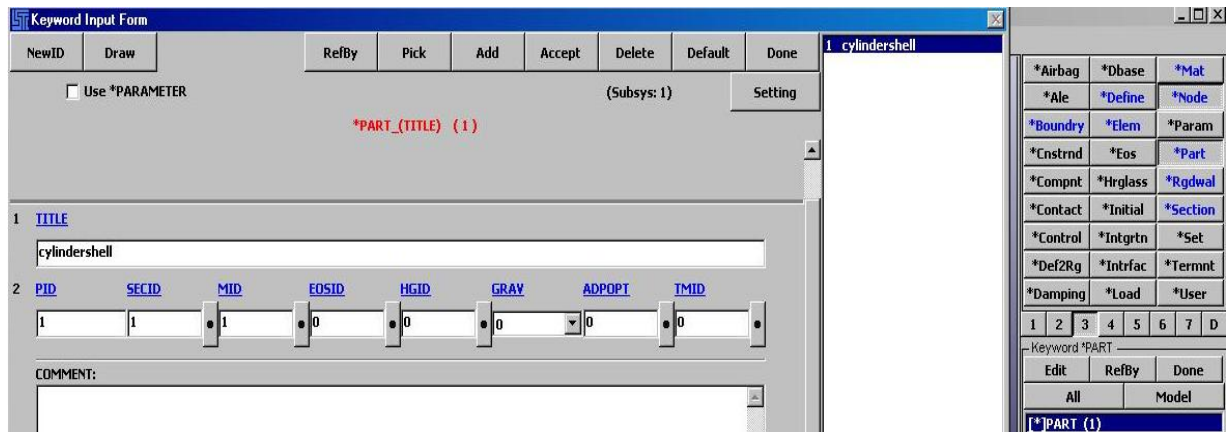
Keyword *SECTION

Edit RefBy Done

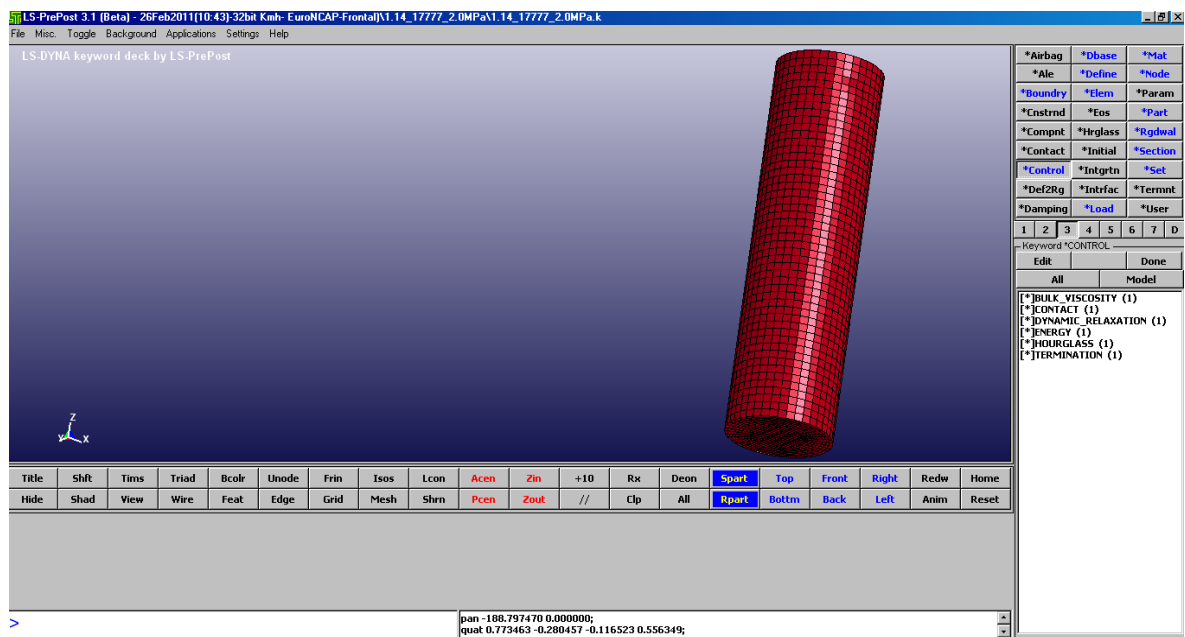
All Model

ALE2D
BEAM
BEAM_AISC
DISCRETE
POINT_SOURCE
POINT_SOURCE_MIXTURE
SPRING_DAMPER
SEATBELT
[*] SHELL (1)
SHELL_ALE
SHELL_EFG
SHELL_THERMAL
SOLID
SOLID_ALE
SOLID_EFG
SPH
TSHELL

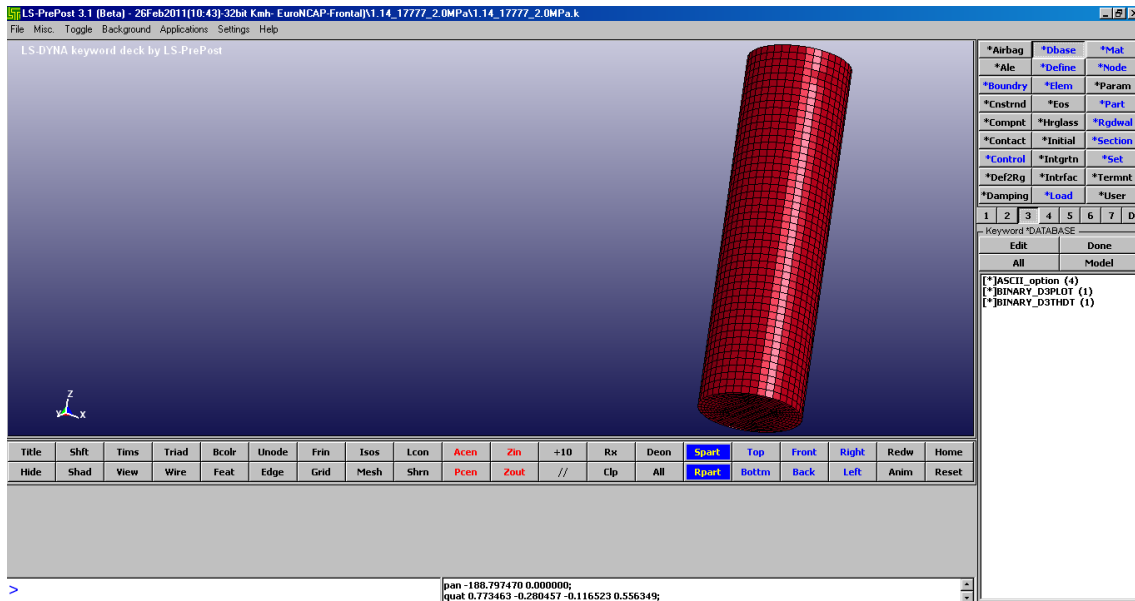
8ºPasso: Atribuição da secção e do material às várias partes envolvidas, neste caso só há uma, seguir a figura seguinte.



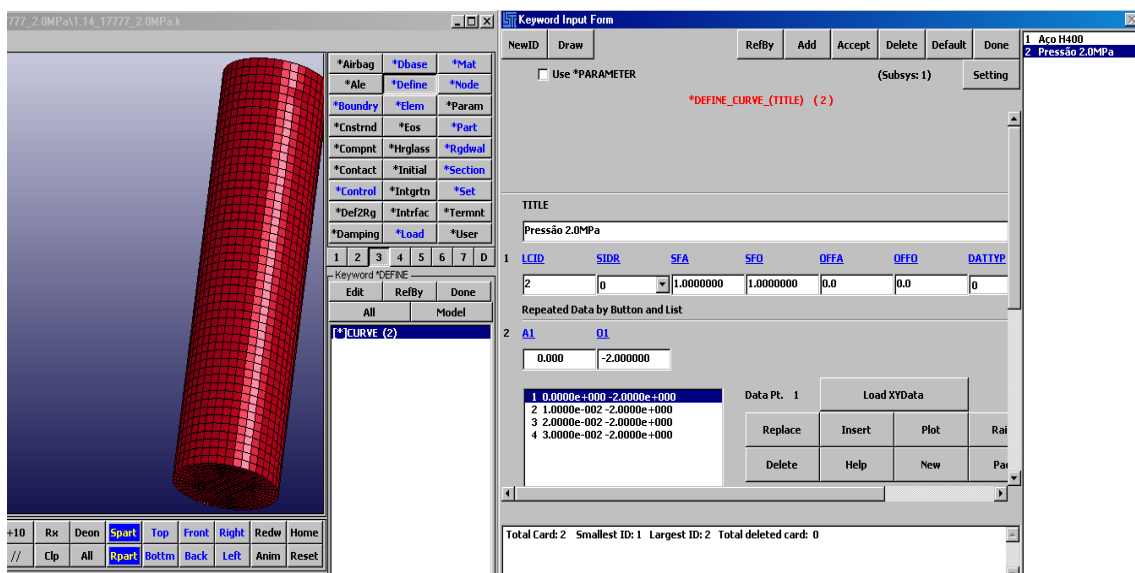
9ºPasso: Escolher os parâmetros a controlar no ensaio, por exemplo terminação do ensaio. Utiliza-se a keyword **Control*

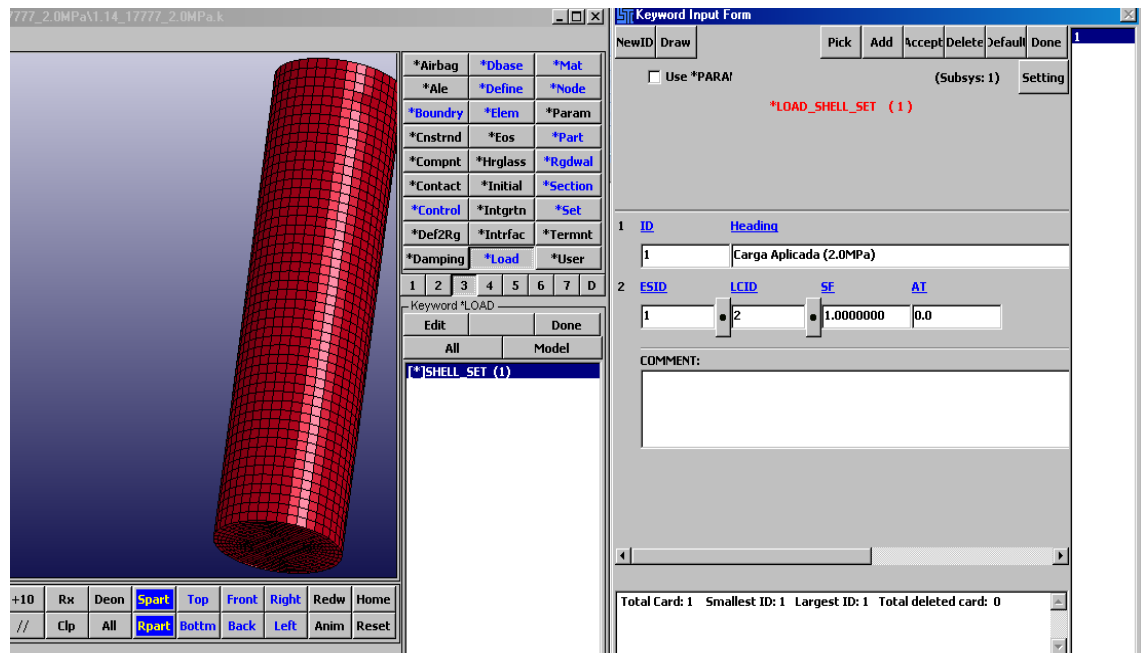
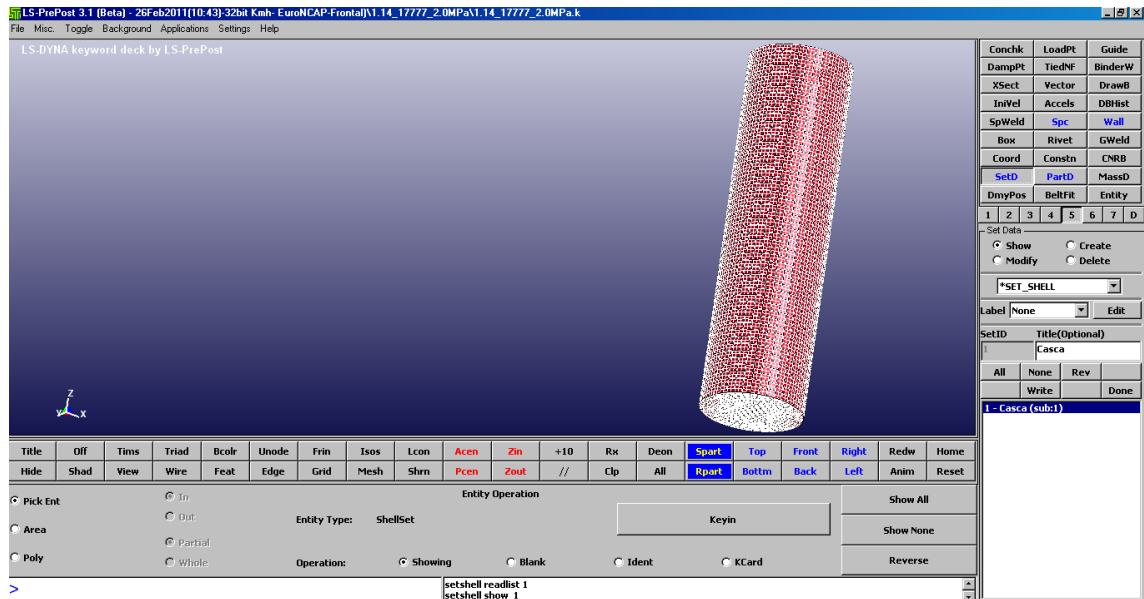


10ºPasso: Escolher os dados a retirar pretendidos para efectuação do estudo. Utiliza-se a keyword ***Dbase**.



11ºPasso: Atribuir pressão interna na estrutura. Primeiro define-se a curva de pressão, caso não tenha já sido feito no passo 5 com a keyword ***Define**. Depois com a Keyword ***SetD** cria-se um novo SET_SHELL. Por fim aplica-se a carga (pressão) com a keyword ***Load**.





12º Passo: Gravar o ficheiro com a extensão .k, desta forma está guardado o trabalho com formato de keyword, compatível com editores de texto (bloco de notas e WordPad).

ANEXO B- Estruturação de uma Keyword completa

```

$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 3.1 (Beta) -
26Feb2011(10:43)
$# Created on May-02-2012 (12:14:45)
*KEYWORD
*TITLE
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*CONTROL_BULK_VISCOSITY
$#      q1      q2      type      btype
    1.500000    0.060000         1         0
*CONTROL_CONTACT
$#  slsfac    rwpnal    islchk    shlthk    penopt    thkchg    orien
enmass
    0.100000    0.000         2         0         1         1         1
0
$#  usrstr    usrfrc    nsbcs    interm    xpene    ssthk    ecdt
tiedprj
    0         0         10         0  4.000000         0         0
0
$#   sfric    dfriac    edc      vfc      th      th_sf    pen_sf
    0.000    0.000    0.000    0.000    0.000    0.000    0.000
$#  ignore    frceng    skiprwg    outseg    spotstp    spotdel    spothin
    0         0         0         0         0         0         0.000
$#   isym    nserod    rwgaps    rwgcth    rwksf    icov    swradf
ithoff
    0         0         0    0.000  1.000000         0    0.000
0
$#  shledg
    0
*CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION
$#  nrcyck    drtol    drfctr    drterm    tssfdr    irelal    edttl
idrflg
    250  0.001000  0.995000    0.000    0.000         0  0.040000
0
*CONTROL_ENERGY
$#   hgen    rwen    slnten    rylen
    1         2         1         1
*CONTROL_HOURLGLASS
$#   ihq      qh
    1  0.100000
*CONTROL_TERMINATION
$#  endtim    endcyc    dtmin    endeng    endmas
    0.030000    0    0.000    0.000    0.000
*DATABASE_BNDOUT
$#   dt      binary    lcur    ioopt
  2.0000E-4         0         0         1
*DATABASE_GLSTAT
$#   dt      binary    lcur    ioopt
  2.0000E-4         0         0         1
*DATABASE_RCFORC
$#   dt      binary    lcur    ioopt
  2.0000E-4         0         0         1
*DATABASE_SPCFORC
$#   dt      binary    lcur    ioopt
  2.0000E-4         0         0         1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#   dt      lcdt    beam    npltc    psetid
  2.0000E-5         0         0         0         0

```

```

$#   iopt
      0
*DATABASE_BINARY_D3THDT
$#   dt      lcdt      beam      npltc      psetid
    2.0000E-5      0      0      0      0
*BOUNDARY_SPC_NODE
$#   nid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry
dofrz
      1      0      1      1      1      1      1
1
      2      0      1      1      1      1      1
1
      3      0      1      1      1      1      1
1
      4      0      1      1      1      1      1
1
      5      0      1      1      1      1      1
1

```

(...)

```

*LOAD_SHELL_SET_ID
$#   id
heading
      1Carga Aplicada (2.0MPa)
$#   esid      lcid      sf      at
      1      2      1.000000      0.000
*PART
$# title
cylindershell
$#   pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt
tmid
      1      1      1      0      0      0      0
0
*SECTION_SHELL_TITLE
Casca
$#   secid      elform      shrf      nip      propt      qr/irid      icomp
setyp
      1      2      1.000000      5      1      0      0
1
$#   t1      t2      t3      t4      nloc      marea      idof
edgset
    1.140000  1.140000  1.140000  1.140000      0.000      0.000      0.000
0
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_TITLE
Aço H400
$#   mid      ro      e      pr      sigy      etan      fail
tdel
      1 7.3800E-9 2.1000E+5 0.300000 453.00000      0.0001.0000E+21
0.000
$#   c      p      lcsl      lcsr      vp
    1150.0000  7.750000      1      0      0.000
$#   eps1      eps2      eps3      eps4      eps5      eps6      eps7
eps8
    0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
0.000
$#   es1      es2      es3      es4      es5      es6      es7
es8

```

```

0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
0.000
*RIGIDWALL_PLANAR_MOVING_ID
$#      id
title
      1Parede Móvel
$#      nsid      nsidex      boxid      offset      birth      death      rwksf
      0      0      0      0.000      0.0001.0000E+20      1.000000
$#      xt      yt      zt      xh      yh      zh      fric
wvel
      0.000      0.000 250.00000      0.000      0.000 125.00000      1.000000
0.000
$#      mass      v0
      0.076000 17780.000
*DEFINE_CURVE_TITLE
Aço H400
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      1      0      1.000000      1.000000      0.000      0.000      0
$#
      al      ol
      0.000      453.0000000
      0.0055380      507.2699890
      0.0246900      615.0000000
      0.0800430      758.3300171
      0.1300500      854.1599731
      0.2515400      1030.5000000
      0.2835100      1013.0000000
*DEFINE_CURVE_TITLE
Pressão 2.0MPa
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      2      0      1.000000      1.000000      0.000      0.000      0
$#
      al      ol
      0.000      -2.0000000
      0.0100000      -2.0000000
      0.0200000      -2.0000000
      0.0300000      -2.0000000
*SET_SHELL_LIST_TITLE
Casca
$#      sid      da1      da2      da3      da4
      1      0.000      0.000      0.000      0.000
$#      eid1      eid2      eid3      eid4      eid5      eid6      eid7
eid8
      1      2      3      4      5      6      7
8
      9      10      11      12      13      14      15
16
      17      18      19      20      21      22      23
24
      25      26      27      28      29      30      31
32

(...)

*ELEMENT_SHELL
$#      eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6
n7      n8
      1      1      1      12      13      2      0      0
0      0
      2      1      2      13      14      3      0      0
0      0

```

0 3 1 3 14 15 4 0 0
 0

(...)

*NODE

\$#	nid	x	y	z	tc
rc					
	1	12.3743687	12.3743687	0.000	0
0					
	2	9.8994951	12.3743687	0.000	0
0					
	3	7.4246211	12.3743687	0.000	0
0					

(...)

*END

ANEXO C- Desenho Técnico da Estrutura

ANEXO D- Desenho Técnico da Estrutura com Redução de Espessura

